



EPS

Escola Politècnica

UdG

Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: Anàlisi de les tensions de xoc en una llanta de bicicleta

Document: Memòria i annexos

Alumne: Adrià Reixach Ferran

Director/Tutor: Lluís Ripoll i Masferrer

Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria (mes/any): Setembre/2014

1. INTRODUCCIÓ	3
1.1. Antecedents	3
1.2. Objecte	3
1.3. Abast	4
1.4. Especificacions	4
2. PLANTEJAMENT	6
2.1. Introducció	6
2.2. Dinàmica de la bicicleta (Working Model)	7
2.2.1. El programa de simulació	7
2.2.2. La bicicleta	7
2.2.3. El ciclista	8
2.3. Elements finits (ANSYS)	9
2.3.1. La llanta	9
2.3.2. Nomenclatura utilitzada de la llanta	10
3. MODELITZACIÓ DINÀMICA	11
3.1. Representació de la bicicleta	11
3.2. Representació del ciclista	12
3.3. Conjunt bicicleta-ciclista	14
3.4. El cas d'estudi	17
4. CÀLCUL DE LES TENSIONS A LA LLANTA	20
4.1. Representació de la llanta	20
4.2. Representació del pneumàtic	22
4.3. Simplificacions	24
4.4. El mallat	25
4.5. El cas d'estudi	27
5. RESULTATS	31
5.1. Força d'impacte (Working Model)	31
5.2. Tensions a la llanta (elements finits – ANSYS)	32
5.3. Estudi del cas límit	41
6. RESUM DEL PRESSUPOST	44
7. CONCLUSIONS	45
8. RELACIÓ DE DOCUMENTS	47
9. BIBLIOGRAFIA	48

ANNEX A: LA BICICLETA I EL CICLISTA	49
A.1. La bicicleta: Canyon Nerve AL 8.0	50
A.2. El ciclista	53
A.3. La llanta: Mavic Crosstrail 26"	55
ANNEX B: LA SIMULACIÓ EN WORKING MODEL	57
B.1. Introducció	58
B.2. Modelització i efecte del pneumàtic	59
ANNEX C: L'ANÀLISI DE TENSIONS EN ELEMENTS FINITS (ANSYS)	60
C.1. Tipus d'elements	61

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

Quan es circula amb bicicleta a una certa velocitat i s'impacta contra un obstacle o un esgraó per tal de pujar-lo bruscament, la roda rep un impacte molt fort i es pot arribar a produir el fenomen conegut com a "llantasso". Aquest fenomen es produeix quan, degut a la velocitat amb la què s'impacta amb l'esgraó, l'aire de la llanta queda totalment comprimit i desplaçat, de manera que el pneumàtic passa a contactar directament amb la llanta d'alumini i l'esgraó (Figura 1.1).



Figura 1.1: Fenomen conegut com a "llantasso"

Principalment, aquest fenomen pot tenir dues conseqüències. En primer lloc, hi ha un alt perill de que es rebenti la roda de la bicicleta, sobretot si s'utilitza càmera, ja que es pot produir el punxonament d'aquesta. En segon lloc, i amb unes conseqüències més greus, es produeixen uns esforços molt elevats sobre la llanta, cosa per a la qual no està preparada. Per tant, en aquest segon cas, es pot arribar a produir una deformació plàstica permanent de la llanta o, fins i tot, el seu trencament si el xoc és molt important i s'arriba a superar el límit últim del material.

1.2. Objecte

L'objecte del present projecte és determinar analíticament els danys que pot sofrir una llanta de bicicleta quan, degut a l'impacte d'un esgraó o un altre obstacle, aquesta rep la força directa del xoc i es produeix el fenomen anteriorment explicat i conegut com a

“llantasso”. Es vol estudiar si degut al contacte directe entre la llanta, el pneumàtic i l’esgraó, aquesta pot arribar a deformar-se plàsticament o, fins i tot, arribar a produir-se la ruptura del material.

També es vol determinar la velocitat màxima a la qual pot circular la bicicleta per tal que no es produeixi deformació plàstica permanent de la llanta d’aquesta quan s’impacti contra un esgraó.

1.3. Abast

L’abast d’aquest projecte inclou la representació de la bicicleta i del ciclista amb un programa de dibuix per a, posteriorment, dur a terme la modelització dinàmica d’aquests, així com la interacció entre ells i el medi, en un programa de simulació.

Un cop el conjunt bicicleta i ciclista està ben definit, en una velocitat determinada, s’obté el valor de la força màxima d’impacte entre la llanta i l’esgraó. Aquesta força es donarà quan hi hagi absència d’aire al pneumàtic a la zona a estudiar, és a dir, quan es produeixi el “llantasso”.

Un cop se sap el valor de la força màxima d’impacte a una determinada velocitat, amb un programa d’elements finits es determinen analíticament les tensions que suporta la llanta, i si aquestes arriben a produir deformació plàstica o fins i tot trencament de la llanta. Només es valora la presència o no de deformació plàstica, no el seu valor numèric ni les posteriors conseqüències sobre la deformació de la llanta.

També es determina la velocitat màxima a la qual pot circular la bicicleta per tal de que les tensions de la llanta no superin el valor del límit elàstic del material i, per tant, evitar l’aparició de deformació plàstica.

1.4. Especificacions

La bicicleta que s’analitza en aquest estudi és una bicicleta de muntanya, concretament una Canyon Nerve AL 8.0, la qual té unes llantes Mavic Crosstrail, de 26 polzades. S’ha utilitzat un ciclista de 1,70 metres d’alçada, amb un pes de 65 kg. Així doncs, la bicicleta també ha estat escollida amb la seva talla més petita (S), per tal d’acomodar el ciclista de la forma més real possible.

El cas que s'estudiarà serà un impacte contra un esgraó de 15 cm d'alçada. Aquest esgraó es considera de formigó i indeformable.

La velocitat de la bicicleta en el moment de l'impacte és de 5 metres per segon, és a dir, 18 quilòmetres per hora. Aquesta velocitat ha estat escollida perquè es considera una velocitat prou elevada per tal que s'arribi a produir el fenomen anteriorment descrit i és una velocitat bastant raonable per circular amb bicicleta.

2. PLANTEJAMENT

2.1. Introducció

Aquest projecte consta de diverses parts, les quals estan resumides a la Figura 2.1.

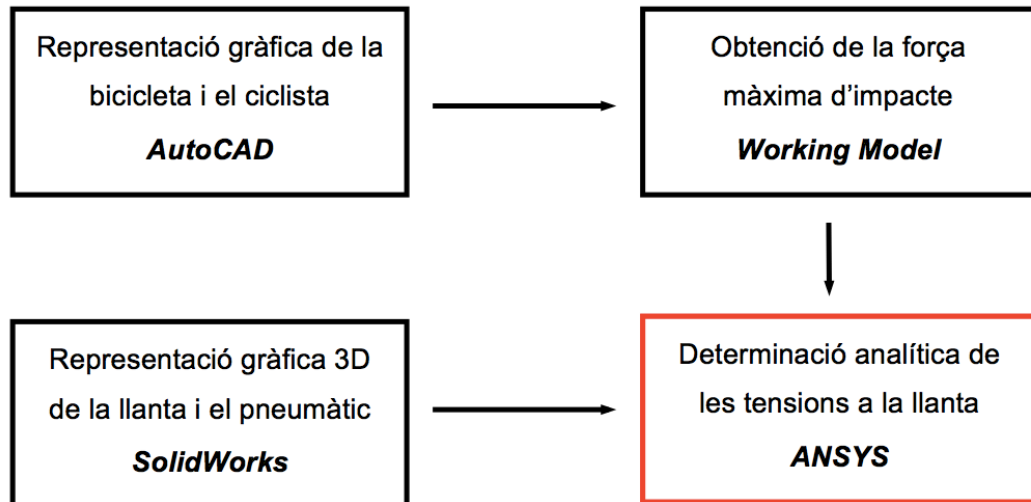


Figura 2.1: Parts que formen el projecte

La representació gràfica de la bicicleta i el ciclista es duu a terme amb el programa de dibuix AutoCAD, mentre que per la llanta i el pneumàtic s'utilitza el programa SolidWorks, el qual permet dibuixar en tres dimensions. Ambdós programes permeten la posterior exportació del model dibuixat al Working Model i a l'ANSYS, respectivament.

Tot seguit cal fer la modelització informàtica de la bicicleta i el ciclista amb el programa Working Model, per tal d'obtenir la força màxima d'impacte de la llanta contra l'esgraó a una velocitat determinada.

Un cop es sap el valor d'aquesta força màxima, per mitjà del programa d'elements finits ANSYS, es determinen analíticament les tensions a la llanta i es valora la possible deformació plàstica o fins i tot el trencament de la llanta.

Posteriorment, també s'estudia la velocitat màxima a la qual pot circular la bicicleta perquè les tensions a la llanta no superin el límit elàstic del material. Per fer-ho, cal fer el procés a la inversa, és a dir, trobar la força que crea una tensió màxima igual al límit elàstic i, posteriorment, buscar la velocitat a la qual la força màxima d'impacte assoleix el valor anteriorment trobat.

2.2. Dinàmica de la bicicleta (Working Model)

2.2.1. El programa de simulació

Per dur a terme l'anàlisi dinàmic de la bicicleta juntament amb el ciclista, s'ha optat per el programa de simulació Working Model 2D. Aquest programa permet la modelització d'elements en dues dimensions juntament combinats amb ressorts, amortidors, cadenes, motors, etc. així com l'aplicació d'accions (forces, moments, desplaçaments, etc.) sobre aquests elements.

Posteriorment, el software és capaç de simular la interacció entre tots els elements del conjunt i mostrar-ne el resultat visualment o bé extreure diversos valors de les magnituds desitjades. En el cas d'aquest projecte, serveix per a trobar el valor màxim de la força d'impacte sobre la llanta.

2.2.2. La bicicleta

La bicicleta amb la qual s'ha realitzat aquest estudi és una bicicleta de muntanya feta d'alumini, de gamma mitjana-alta. Es tracta del model Canyon Nerve AL 8.0 de l'any 2013 (Figura 2.2).



Figura 2.2: Canyon Nerve AL 8.0

Es tracta d'una bicicleta de doble suspensió, amb un recorregut de 120 mm tant al davant com al darrere. Està orientada a l'usuari polivalent; no és una bicicleta molt lleugera

per a competicions de Cross-country ni tampoc és una bicicleta per a practicar el descens. No obstant, és una molt bona bicicleta per a un usuari aficionat a la BTT que li agrada practicar aquest esport de manera polivalent.

A l'hora d'estudiar la força d'impacte, una de les característiques de la bicicleta que tindrà més pes serà la presència o no de suspensió al davant (amortidor a la forquilla). A part del seu recorregut, la constant elàstica i la constant d'esmoreïment són de vital importància per quantificar el valor d'aquesta força.

2.2.3. El ciclista

El ciclista utilitzat en aquest estudi és el realitzat anteriorment per Gerard Guillamet en el seu projecte final de carrera (Figura 2.3). Aquest ciclista també el va utilitzar l'estudiant Marc Brujats, i en va fer dues modificacions:

- Reducció de l'alçada del ciclista de 1,80 m a 1,70 m tot reduint proporcionalment cadascuna de les parts del cos.
- Introducció de l'articulació del turmell, la qual no era necessària en el projecte realitzat per Gerard Guillamet. Tant en el cas del projecte de Marc Brujats com en el present projecte sí que té importància la presència d'articulació al turmell per tal d'aconseguir el màxim de realisme possible.

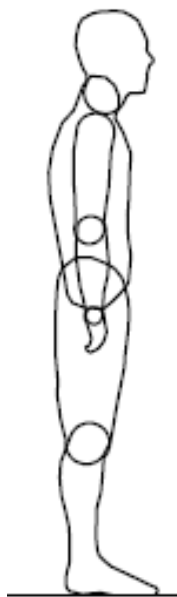


Figura 2.3: Ciclista realitzat per Gerard Guillamet

2.3. Elements finits (ANSYS)

El programa d'elements finits escollit per dur a terme l'anàlisi de les tensions a la llanta de bicicleta ha estat l'ANSYS Workbench. S'ha considerat la gran facilitat que comporta poder fer el disseny de la llanta amb un programa de dibuix com el SolidWorks i, posteriorment, exportar tot el conjunt directament al programa d'elements finits.

El valor de la força que s'obtingui amb el programa de simulació Working Model s'aplicarà a la caixa i d'aquesta manera es podran estudiar les tensions de la llanta.

2.3.1. La llanta

Les llantes d'aquesta bicicleta són de la marca Mavic Crosstrail (Figura 2.4), amb un diàmetre de 26 polzades. Són unes llantes d'alumini molt avançades tecnològicament, les quals tenen només 24 radis per tal d'alleugerir pes. Tant els radis com la llanta estan fets d'un alumini semblant al 6106, tot i que segons el fabricant és un 30% més resistent i més lleuger. D'aquesta manera es pot aconseguir una llanta més lleugera i amb menys inèrcia, la qual és una característica molt valorada pels amants d'aquest esport ja que facilita l'arrencada i la pedalada en llocs complicats.



Figura 2.4: Mavic Crosstrail

2.3.2. Nomenclatura utilitzada de la llanta

La nomenclatura de la llanta del present projecte és la típica d'una llanta de bicicleta. Les parts de les quals està composta la llanta són:

1. **Anell de la llanta:** és la part circular a la qual hi va col·locat el pneumàtic i permet inflar-lo d'aire. En la llanta estudiada en aquest projecte la part més externa de l'anell és llisa per tal de poder utilitzar el sistema *tubeless* i poder prescindir de càmera.
2. **Radis:** són les unions entre l'anell de la llanta i la caixa. En aquest cas n'hi ha 24, tot i que la majoria de llantes en solen tenir més.
3. **Boixa:** és la part central de la llanta. Per la part externa està en contacte amb els radis i per la part interna està en contacte amb l'eix davanter de la bicicleta.

A la Figura 2.5 es poden observar els diversos components d'aquesta llanta:

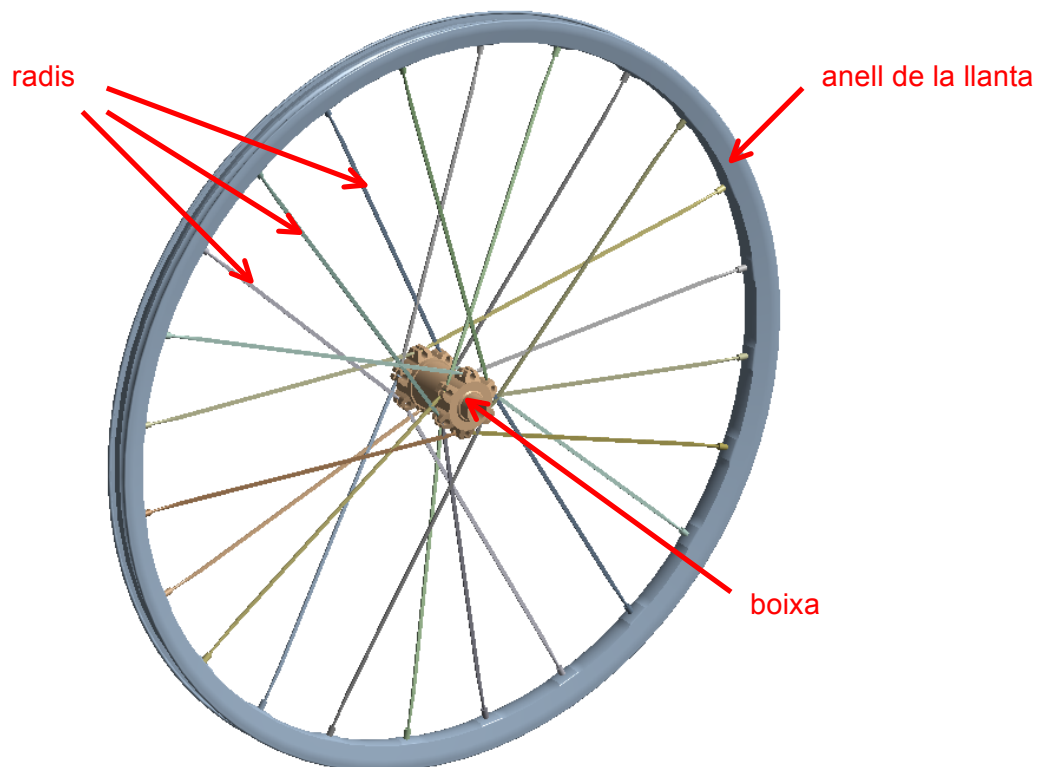


Figura 2.5: Nomenclatura utilitzada de la llanta Mavic Crosstrail

3. MODELITZACIÓ DINÀMICA

3.1. Representació de la bicicleta

Per a poder analitzar la bicicleta amb el programa de simulació Working Model 2D, primer se n'ha de fer la seva representació gràfica. Com que les eines de dibuix de què disposa el programa Working Model no són massa bones, es decideix fer la representació estructural del model a analitzar amb el programa de dibuix AutoCAD. Posteriorment, el programa Working Model sí que permet la importació d'arxius amb el format d'intercanvi d'AutoCAD (DXF).

Com que el que interessa és considerar cada part de la bicicleta com un sòlid independent dels altres i que aquests interactuïn entre ells amb les unions corresponents (articulació, unió rígida, ressort, amortidor, etc), cada part de la bicicleta ha de constar com un cos diferent pel programa de simulació Working Model. Per aconseguir això cada part ha d'estar dibuixada com un polígon tancat (Figura 3.1).



Figura 3.1: Representació de la bicicleta en AutoCAD

Com que es realitza la representació de cada part amb polígons tancats, el programa Working Model interpreta cada part com un cos i se li poden assignar unes propietats, com per exemple la massa i així crear un model molt més real.

La bicicleta a estudiar és una bicicleta de doble suspensió, és a dir, té amortidor a davant i al darrere. Actualment, les suspensions de les bicicletes són molt complexes i tenen

un alt grau de configuració per part de l'usuari: se'n pot variar la constant elàstica tot afegint o traient aire a la forquilla i també la constant d'amortiment tot regulant una rodeta present a la part inferior d'aquesta.

Per tal de simular les suspensions amb el programa de simulació, s'ha escollit utilitzar conjunts ressort-amortidor de primer grau ja presents en el programa. Per definir-los només calen les dades de la constant elàstica i la constant d'amortiment.

Un cop el model de la bicicleta està definit (Figura 3.2), a falta de posicionar el ciclista sobre la bicicleta, s'introdueixen unes dades de constants elàstica i d'amortiment aproximades. Les dades correctes de constants elàstica i amortiment seran introduïdes més endavant, quan el ciclista estigui col·locat sobre la bicicleta.

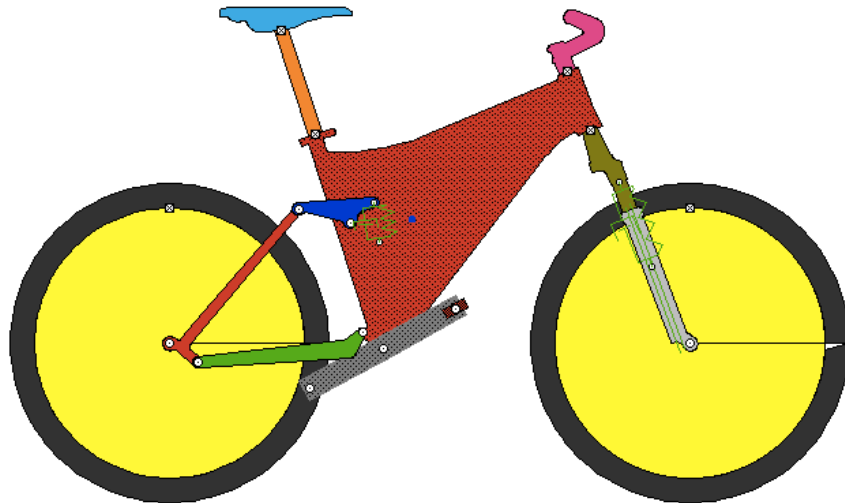


Figura 3.2: Representació de la bicicleta en Working Model

3.2. Representació del ciclista

El ciclista que s'ha utilitzat en aquest estudi és una modificació de l'utilitzat en el projecte final de carrera de Gerard Guillaumet: s'ha reduït la seva alçada i s'ha afegit l'articulació del turmell (Figura 3.3). En el present projecte s'ha agafat directament el ciclista modificat per l'estudiant Marc Brujats, que ja en va fer les modificacions explicades a l'apartat 2.1.3.

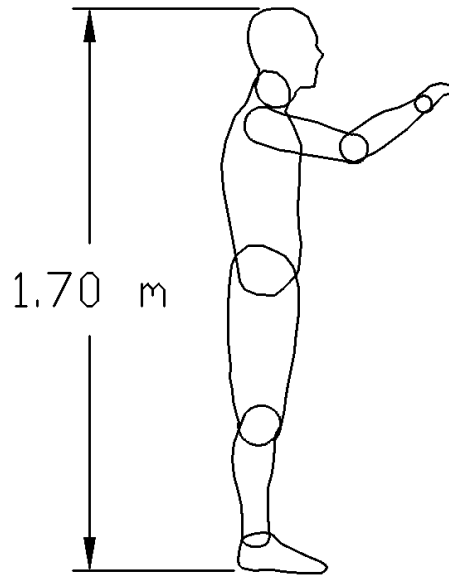


Figura 3.3: Representació del ciclista en AutoCAD

De la mateixa manera que s'ha fet amb la bicicleta, s'ha importat el ciclista dibuixat en AutoCAD al programa de simulació Working Model amb el format d'intercanvi DXF. D'aquesta manera, al tractar-se de polígons tancats, es pot associar una massa a cadascun dels cossos amb el programa de simulació i així millorar-ne el comportament del conjunt.

Un cop cada part del ciclista ja està importada al Working Model i la seva respectiva massa està definida, cal unir les diverses parts del cos mitjançant articulacions i, posteriorment, unir les que tenen contacte directe a través d'un conjunt ressort-amortidor (Figura 3.4) per tal de crear un moviment real durant la simulació.

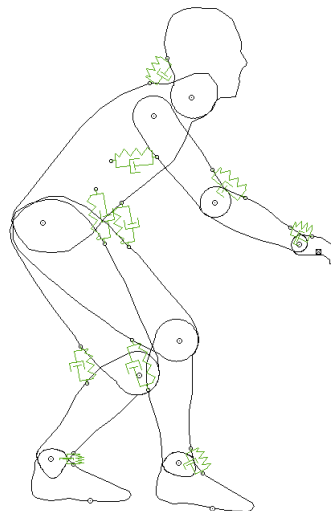


Figura 3.4: Representació del ciclista en Working Model

El valor d'aquestes constants elàstiques i d'amortiment encara no queden ben definides en aquest punt del projecte, ja que més endavant, en el conjunt bicicleta-ciclista, serà quan es podrà avaluar correctament el comportament de les dues parts conjuntament i s'acabaran de definir aquests valors.

3.3. Conjunt bicicleta-ciclista

Per tal de crear correctament la unió del ciclista amb la bicicleta (Figura 3.5), cal definir els diversos punts d'unió:

1. **Unió amb els pedals:** El ciclista té els peus recolzats sobre els pedals en tot moment i, per tant, es crea una unió rígida amb aquests. No obstant, el pedal sí que està articulat amb la biela i es el que permet el gir entre aquests dos últims.
2. **Unió amb el manillar:** La ma del ciclista està unida rigidament amb el manillar. No obstant, també hi ha l'articulació del canell que permet el moviment rotatiu entre el manillar i l'avantbraç del ciclista.

Cal tenir en compte que el cul del ciclista no té contacte amb el seient, sinó que es troba lleugerament alçat. Així mateix, el ciclista tampoc pedala i està estàtic, únicament sostingut per l'efecte dels ressorts que no el deixen moure excessivament respecte la posició inicial donada.

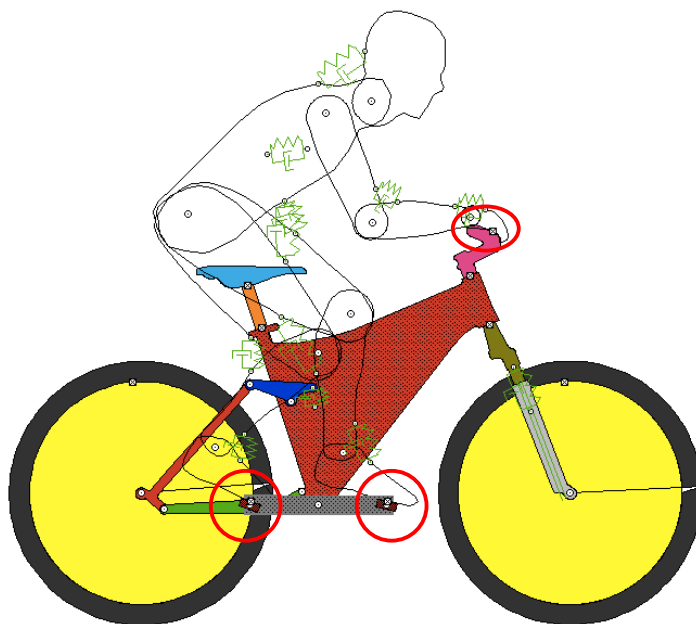


Figura 3.5: Representació de la bicicleta i ciclista en Working Model

Un cop la bicicleta i el ciclista estan units, el següent pas és acabar de definir correctament les constants elàstiques i d'amortiment tant de la bicicleta com del ciclista. Per a fer-ho, s'han utilitzat diversos mètodes:

1. **Lectura del SAG¹:** Aquest mètode permetrà trobar el valor de la constant elàstica de les dues suspensions de la bicicleta, és a dir, quan la bicicleta està en repòs. S'intentarà obtenir un SAG d'un 20-30%, que és el més habitual en la majoria de bicicletes. Per tant, com que és conegut que el recorregut total tant de la suspensió davantera com posterior és de 120 mm, es pot calcular el desplaçament o la longitud que ha de tenir l'amortidor en repòs (Taula 3.1). Cal tenir en compte que la suspensió posterior no té aquesta longitud pròpiament dita, sinó que per la llei de la palanca, l'amortidor té un recorregut de 50 mm per tal que el recorregut de la roda sí que sigui de 120 mm.

	Recorregut (mm)	Longitud SAG 30% (mm)	Longitud SAG 20% (mm)	Longitud final (mm)
Suspensió davantera	120	84	96	92
Suspensió posterior	50	35	40	37

Taula 3.1: Longitud final de les suspensions en funció del SAG

Val a dir que aquest mètode (Figura 3.6) només serveix per a trobar les constants elàstiques dels amortidors, i no la constant d'amortiment (aquesta depèn de la velocitat i no del desplaçament).

¹ El SAG és un mètode per calibrar les suspensions de les bicicletes. Consisteix en mesurar l'enfonsament de l'amortidor degut al pes del ciclista, és a dir, el recorregut que té la suspensió quan el ciclista està sobre la bicicleta en repòs. Segons el fabricant, aquest enfonsament ha de ser d'entre un 20 i un 30% del recorregut total de la suspensió. No obstant, segons la configuració que es vulgui donar a la bicicleta, l'usuari pot variar aquest valor segons les seves preferències i així variar-ne el comportament de la suspensió.

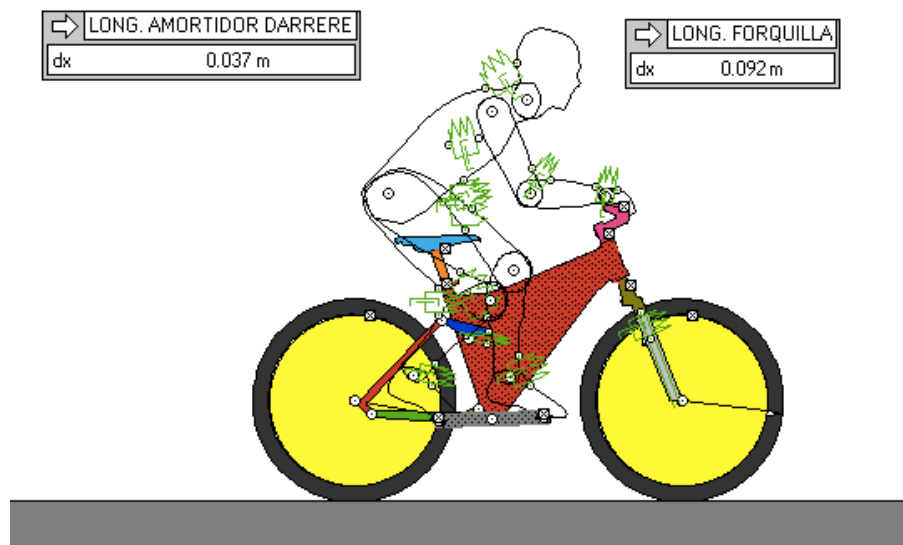


Figura 3.6: Calibració de les suspensions amb el mètode SAG

- 2. Proves de xoc en moviment:** Aquest mètode permetrà determinar la resta de constants, és a dir, les constants d'amortiment de les suspensions i també les constants elàstiques i d'amortiment del ciclista. Per fer-ho, en el programa Working Model s'ha creat un escenari compost d'un esgraó de baixada i un de pujada (Figura 3.7), per tal de poder observar el comportament de la bicicleta i ciclista quan aquesta passa per aquests obstacles a una certa velocitat. L'objectiu és anar corregint el valor de les constants per tal d'aconseguir un comportament del conjunt el màxim real possible. Per fer-ho, cal comprovar que els valors de la longitud de les suspensions no s'apropin molt a zero, ja que això significaria arribar a comprimir la suspensió al 100% i possiblement comportaria problemes mecànics a la bicicleta. Les suspensions estan configurades de tal manera que és pràcticament impossible arribar mai a aquest punt, per tant, també s'ha d'evitar que això passi al programa de simulació. També s'ha de permetre un cert moviment del ciclista respecte la bicicleta, ja que un ciclista mai està totalment rígid.

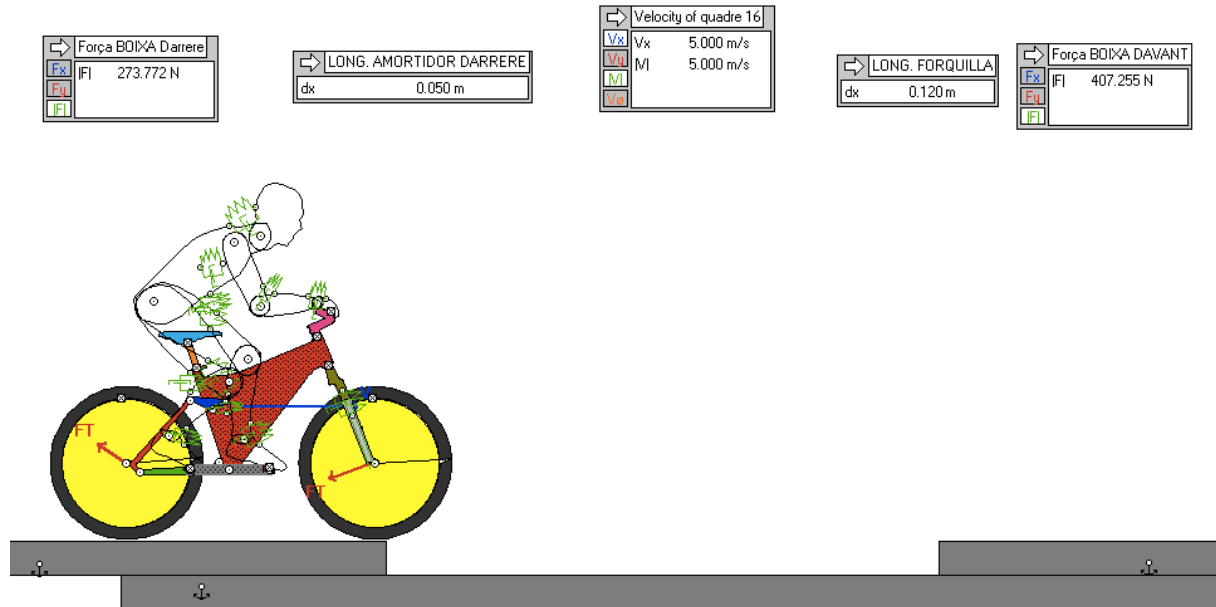


Figura 3.7: Proves per a la determinació de les constants d'amortiment

Cal tenir en compte que aquest projecte és totalment teòric i, per tant, no es té en compte la voluntat del ciclista de variar la posició respecte la bicicleta en cada instant de temps, així com els canvis d'equilibri per tal d'amortir el xoc. És per aquesta raó que, els valors de constants escollits són aproximats, de la mateixa manera que ho seran els posteriors resultats obtinguts.

3.4. El cas d'estudi

Tal com s'ha dit anteriorment, l'objectiu d'aquest projecte és estudiar les tensions a la llanta quan es produeix el "llantasso". Per tal que això es produeixi s'ha d'impactar contra un obstacle a una velocitat bastant elevada, perquè el pneumàtic s'aixafi i es doni el contacte directe entre el pneumàtic i la llanta. Així doncs, el cas a estudiar en aquest projecte és l'impacte contra un esgraó de 15 cm d'alçada a una velocitat de 5 m/s (18 km/h). Amb aquestes condicions, que són bastant adverses, hi ha moltes possibilitats que s'arribi a produir aquest fenomen.

Segons el model prèviament creat, ja es tenia en compte l'efecte de les suspensions de la bicicleta així com l'efecte de les articulacions del ciclista, per tal d'amortir el xoc. No obstant, no s'havia prestat atenció a l'efecte del pneumàtic sobre l'impacte. El pneumàtic principalment actua com a ressort, ja que la seva dissipació d'energia és molt baixa. Per a simular-lo amb el programa Working Model, s'ha optat per afegir un ressort i un amortidor a l'esgraó (Figura 3.8) per així no complicar més la bicicleta, però si variar la interacció entre

l'esgraó i la llanta. Per trobar les constants elàstica i d'amortiment d'aquest element, s'ha intentat aconseguir un desplaçament màxim d'uns 5 cm (alçada total del pneumàtic, la qual tota es comprimeix per tal de produir-se el "llantasso") tot mantenint un valor d'amortiment el més baix possible i buscant un comportament el més real possible.

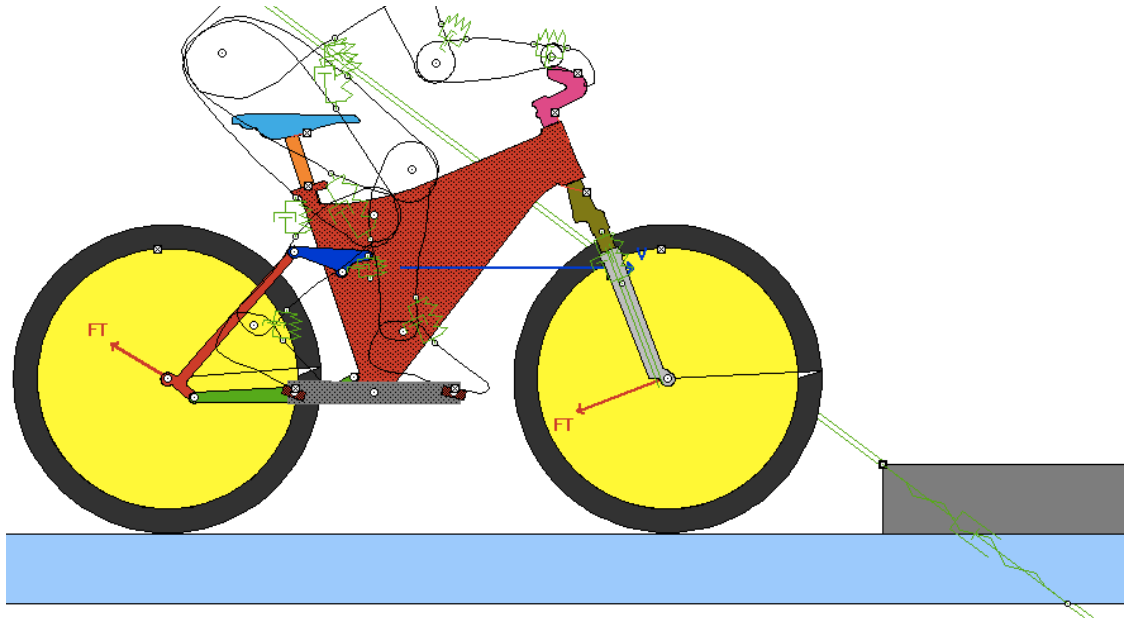


Figura 3.8: Detall del ressort-amortidor de l'esgraó

Un cop tots els elements estan preparats per dur a terme la simulació només cal assignar la velocitat inicial de 5 m/s a tot el conjunt bicicleta i ciclista i mesurar les variables desitjades: força a la caixa del davant i força a la caixa del darrere. En un principi és bastant evident que la caixa del davant serà la que rebrà una major força degut a la major velocitat quan aquesta impacta contra l'esgraó, però cal assegurar-se que sigui realment així. A la Figura 3.9 es pot veure l'escenari que posteriorment servirà per calcular el valor de la força màxima aplicada sobre la llanta.

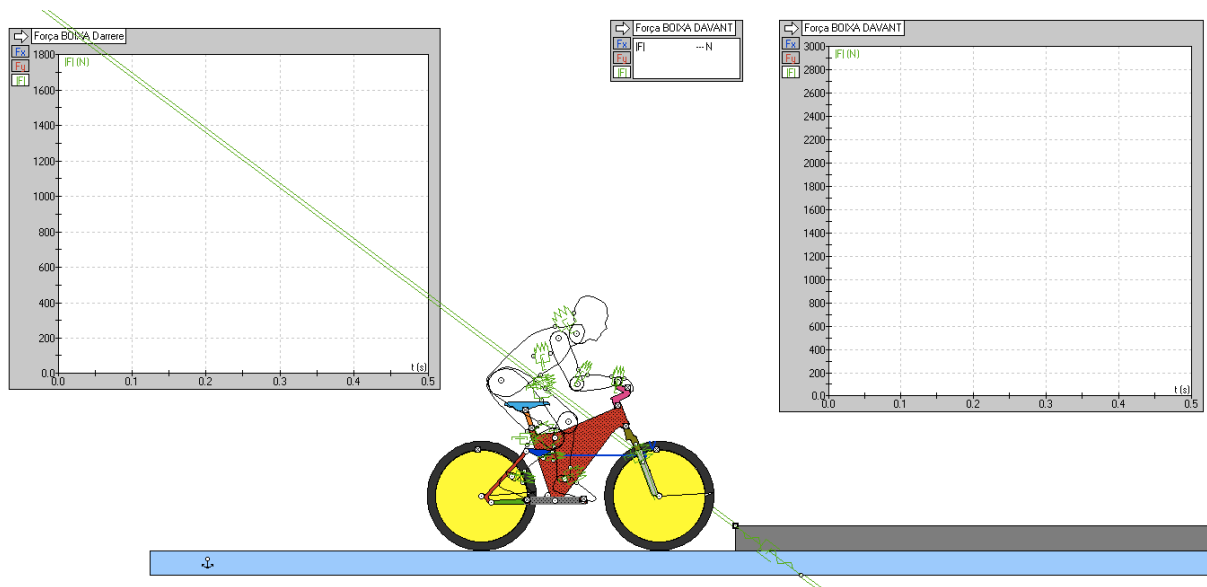


Figura 3.9: Escenari preparat per al càlcul de la força màxima aplicada sobre la llanta

Posteriorment, es tornarà a utilitzar el programa de simulació Working Model per a determinar la velocitat màxima a la que pot circular la bicicleta quan impacti contra l'esgraó per tal que la força creada a la boixa davantera no sigui superior a un valor determinat i així no superar el límit elàstic que produeix la deformació plàstica permanent de la llanta. Amb un valor de força màxima permesa, s'aniran fent proves per tal de trobar la velocitat amb la qual es produeix aquesta força màxima desitjada.

4. Càlcul de les tensions a la llanta

4.1. Representació de la llanta

Per tal de poder estudiar la llanta amb el programa d'element finits ANSYS Workbench, primer cal fer-ne la representació gràfica, per a la qual s'ha escollit el programa de dibuix en 3D SolidWorks. El disseny (Figura 4.1) ha estat fet segons les mides preses amb un peu de rei a una llanta real.



Figura 4.1: Renderització de la llanta Mavic Crosstrail

Val a dir que aquesta llanta està bastant orientada a la modalitat de Cross Country, per la qual cosa una de les seves principals virtuts és estalviar pes. És per aquesta raó que la llanta només disposa de 24 radis, els quals estan més reforçats que els de les llantes convencionals. A més, tal com es pot veure a la Figura 4.2, el fons de la llanta és totalment llis i sense forats, per tal de permetre la utilització del sistema *tubeless* (no utilització de càmera dins del pneumàtic).

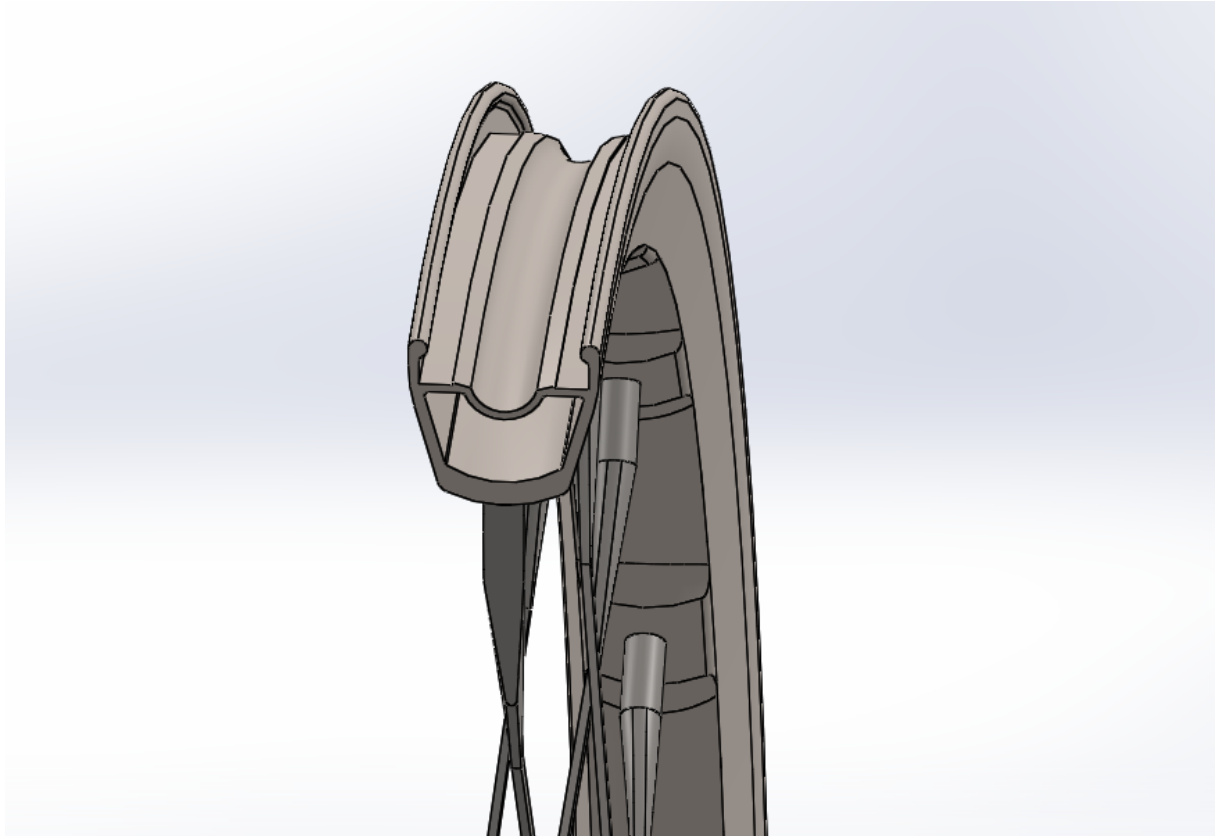


Figura 4.2: Secció de la llanta Mavic Crosstrail

Segons el fabricant Mavic, la llanta està fabricada d'un material anomenat MAXTAL, del qual no se'n saben les propietats exactes. Es tracta d'un material secret semblant a l'alumini 6106, però més resistent i lleuger. No obstant, per al present estudi s'ha considerat que la llanta està fabricada d'alumini 6106, les propietats² del qual estan resumides a la Taula 4.1, i que és un material molt utilitzat en la resta de llantes que es troben al mercat.

Mòdul elàstic (MPa)	70.000
Límit elàstic (MPa)	200
Límit últim (MPa)	250
Allargament (%)	8

Taula 4.1: Propietats de l'alumini 6106

Com que el material a estudiar té una corba tensió-deformació bastant complexa (Figura 4.3), per a realitzar aquest estudi s'ha considerat una corba bilineal, la qual està formada per dues rectes (Figura 4.4). D'aquesta manera s'aconsegueix alleugerir el càlcul tot obtenint uns resultats que no varien molt dels reals.

² Les propietats són extretes del següent document de *Nedal Aluminium B.V.* trobat a internet: http://www.nedalextrusion.com/files/7813/0678/5559/Data_6106.pdf

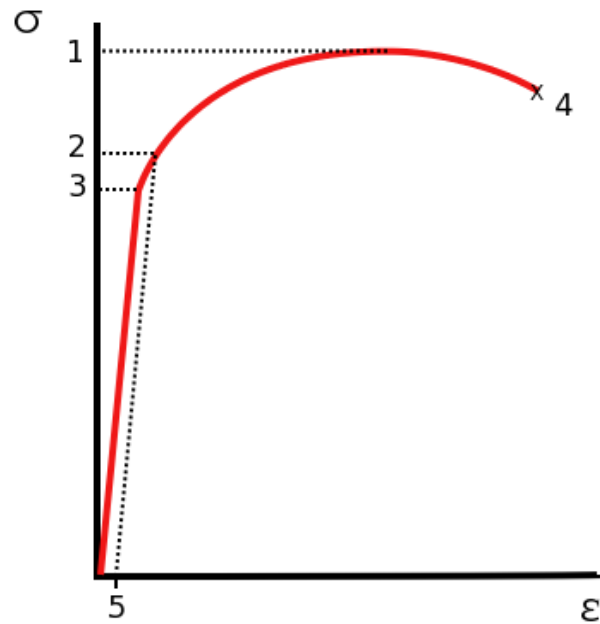


Figura 4.3: Corba tensió-deformació real de l'alumini

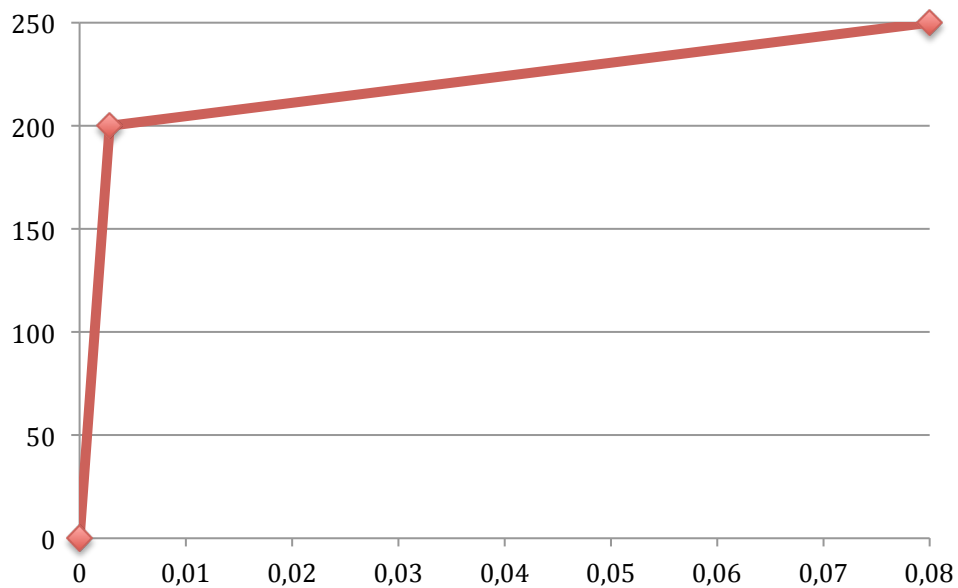


Figura 4.4: Corba tensió-deformació aproximada de l'alumini 6106

4.2. Representació del pneumàtic

En el cas específic d'estudi d'aquest projecte, el pneumàtic té un paper bastant important. Quan es produeix el "llantasso", el pneumàtic és l'únic element que impedeix el contacte directe entre l'anell d'alumini de la llanta i l'esgraó. S'ha considerat un pneumàtic genèric (Figura 4.5), amb unes dimensions aproximades, ja que aquestes poden variar molt en funció del tipus i model de pneumàtic utilitzat.

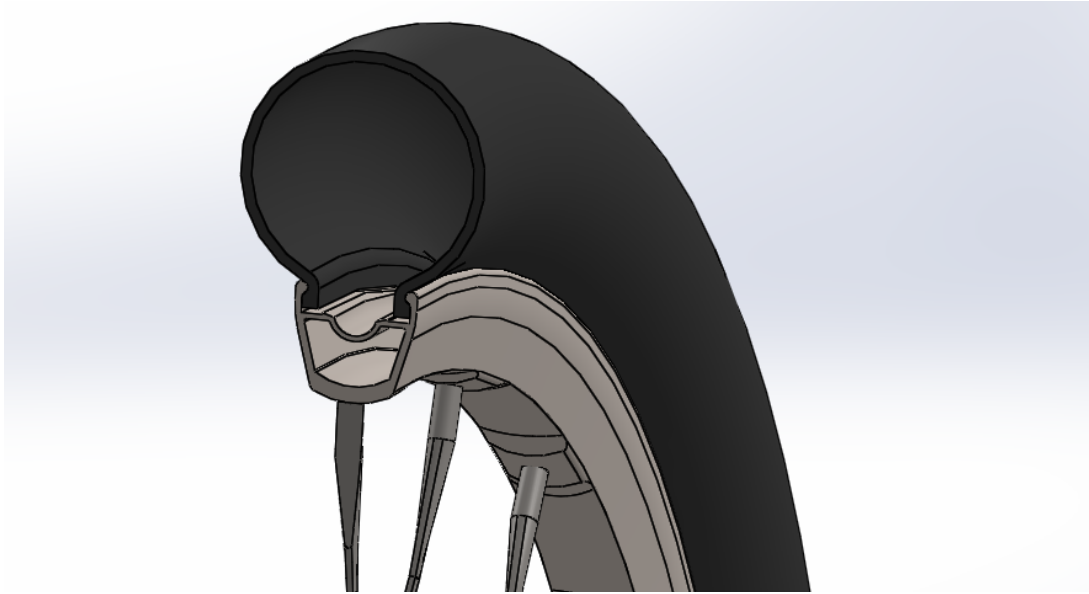


Figura 4.5: Secció del pneumàtic totalment inflat

No obstant, el cas a estudiar no contempla el pneumàtic totalment inflat com en la figura anterior, sinó el pneumàtic completament aixafat (Figura 4.6). Si es parteix d'un model amb el pneumàtic ja aixafat, s'aconsegueixen evitar les grans deformacions en el programa d'elements finits i així agilitzar-ne el càlcul. Pel que fa al gruix del pneumàtic, s'ha considerat un gruix de 2 mm pels laterals i un gruix de 3 mm per la part que té contacte amb el terra. Així doncs, hi ha un gruix total de 5 mm entre l'anell de la llanta i l'esgraó.

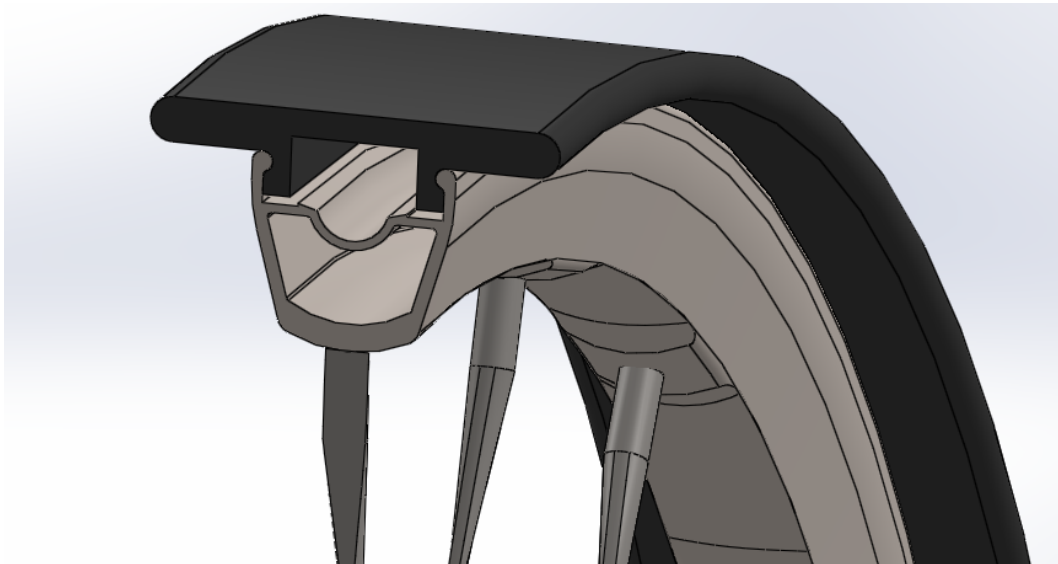


Figura 4.6: Secció del pneumàtic aixafat

El compost del pneumàtic està format per diversos materials, la major part dels quals és cautxú. Com que no tot el pneumàtic és uniforme pel que fa al material, és difícil trobar-ne les propietats exactes. A més, el fet de tractar-se d'un material híper-elàstic comporta

diversos inconvenients. En primer lloc és molt difícil de modelitzar, ja que tot i que es poden utilitzar diverses equacions model, és molt difícil trobar-ne els paràmetres exactes del pneumàtic a estudiar. A més, al tractar-se d'un material no lineal, el càlcul es fa molt feixuc i es necessiten d'eines de càlcul amb una potència considerable. Així doncs, per tal de simplificar la modelització del pneumàtic de la bicicleta, s'ha escollit utilitzar un material amb unes propietats lineals, amb un mòdul elàstic de 100 MPa.

4.3. Simplificacions

Un cop la llanta i el pneumàtic ja estan modelitzats, cal simplificar-los al màxim abans de dur a terme l'anàlisi amb elements finits. Les simplificacions que s'han dut a terme són les següents:

- 1. Eliminació dels radis que treballen a compressió:** en una llanta de bicicleta, els radis només treballen a tracció, de manera que els que haurien de treballar a compressió no treballen en absolut. És per aquesta raó que s'ha anat comprovant un per un cada radi per tal d'identificar-ne el seu comportament. Per fer-ho, s'ha estudiat la tensió de contacte entre el radi i la caixa amb el programa d'elements finits, i comprovant si aquesta era positiva (tracció) o negativa (compressió). Finalment s'han hagut d'eliminar 5 radis dels 24 que té la llanta.
- 2. Simplificació de peces i arestes:** les peces que uneixen el radi amb l'anell de la llanta, han estat simplificades i unides al radi, de manera que aquesta peça pròpiament dita ha estat eliminada i ha passat a formar part de la peça radi. A més, s'han intentat eliminar les arestes arrodonides, ja que al programa d'elements finits li és més fàcil fer el mallat en elements que tinguin arestes amb un aixamfranat de radi zero.
- 3. Reforçament dels radis:** s'ha decidit reforçar els radis en la unió amb l'anell de la llanta, ja que en les primeres proves s'ha detectat una concentració de tensions en aquest punt. Això podria ser degut a un disseny en el qual s'ha hagut de fer un radi una mica esbiaixat per tal de seguir el model real de la llanta. No obstant, en la llanta real els radis queden pràcticament rectes degut al pretesat que se'ls hi aplica.

4. **Presència de pneumàtic només al punt de contacte amb l'esgraó:** com que la única part de pneumàtic que interessa és la que té contacte amb l'esgraó, s'ha decidit eliminar la resta de pneumàtic, ja que no té cap efecte sobre el conjunt i així s'aconsegueix fer més ràpid el càlcul.

A la Figura 4.7 es pot observar el model final un cop fetes totes les simplificacions anteriorment explicades.

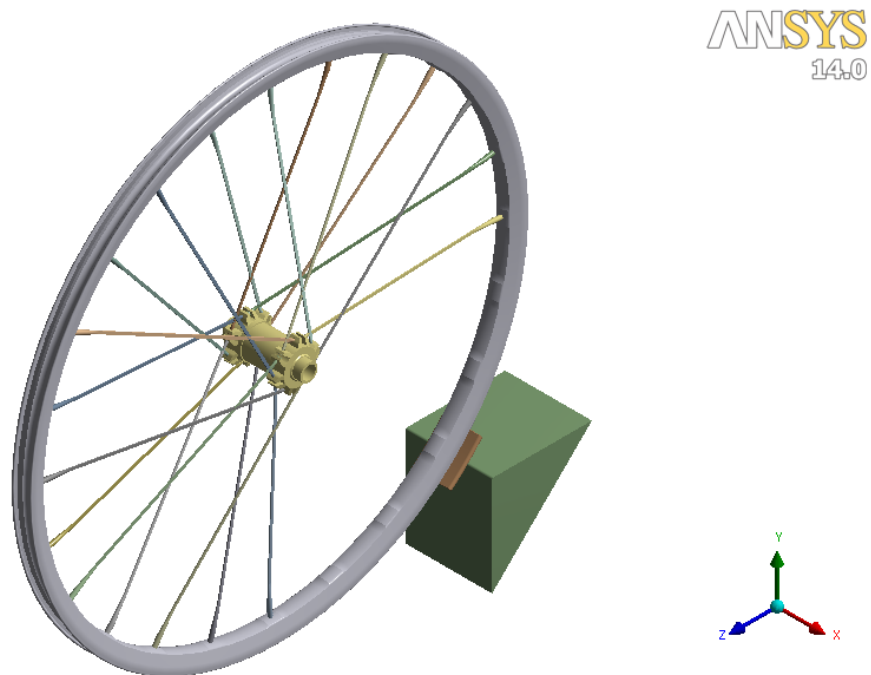


Figura 4.7: Model simplificat utilitzat al programa d'elements finits

4.4. El mallat

El programa ANSYS Workbench crea automàticament el mallat del model sempre que li sigui possible. El mallat que fa per defecte el programa és acceptable, però té alguns aspectes que es poden millorar. Les modificacions aplicades al mallat respecte el mallat per defecte són les següents:

1. **Utilització del mètode HEX DOMINANT:** el programa per defecte utilitza elements de tres vèrtexs per cara (SOLID187), els quals funcionen bastant bé. No obstant, per millorar el resultat es poden utilitzar elements de quatre vèrtexs per cara (SOLID186) quan es pugui. Aquests elements tenen l'avantatge de que són deformables respecte als elements de tres vèrtexs per cara predeterminats pel programa.

2. **Mètode d'integració completa dels elements:** els elements de quatre vèrtexs per cara SOLID186 tenen 20 nodes, però per defecte el programa només fa la integració respecte un node central de l'element per tal d'alleugerir-ne el càlcul. No obstant, s'ha canviat aquesta opció perquè el programa faci la integració de tots 20 nodes i així aconseguir un resultat més precís.
3. **Disminució de la mida dels elements que conformen el mallat:** per defecte, el programa utilitza una mida estàndard per tots els elements del conjunt. Per tal de millorar el resultat en les zones més crítiques i amb més importància, s'ha canviat la mida dels elements de la següent manera: als radis i al pneumàtic s'ha escollit una mida dels elements de 2 mm, i a la zona de l'anell de la llanta més propera al pneumàtic s'ha escollit una mida dels elements de 1 mm.

A la Figura 4.8 i a la Figura 4.9 es pot observar el mallat sencer de tot el conjunt i el mallat amb més detall del pneumàtic i de la zona més crítica de l'anell de la llanta.

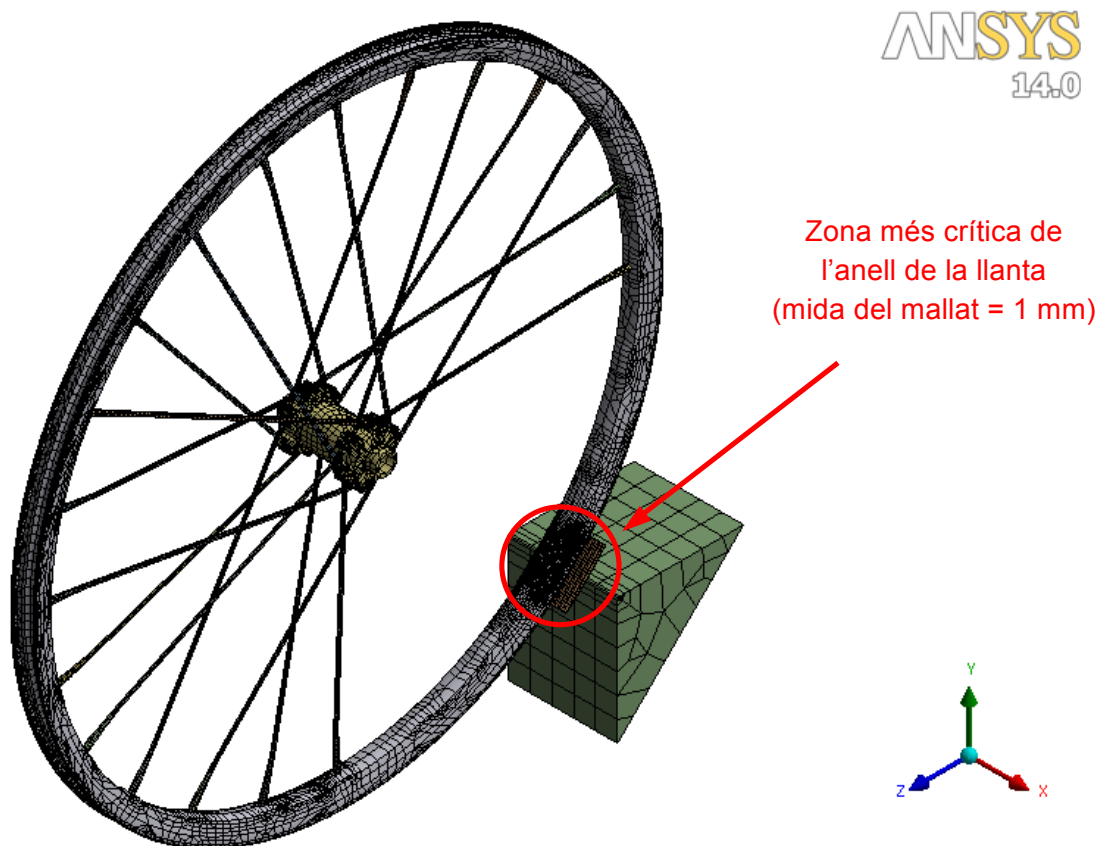


Figura 4.8: Mallat de tot el conjunt

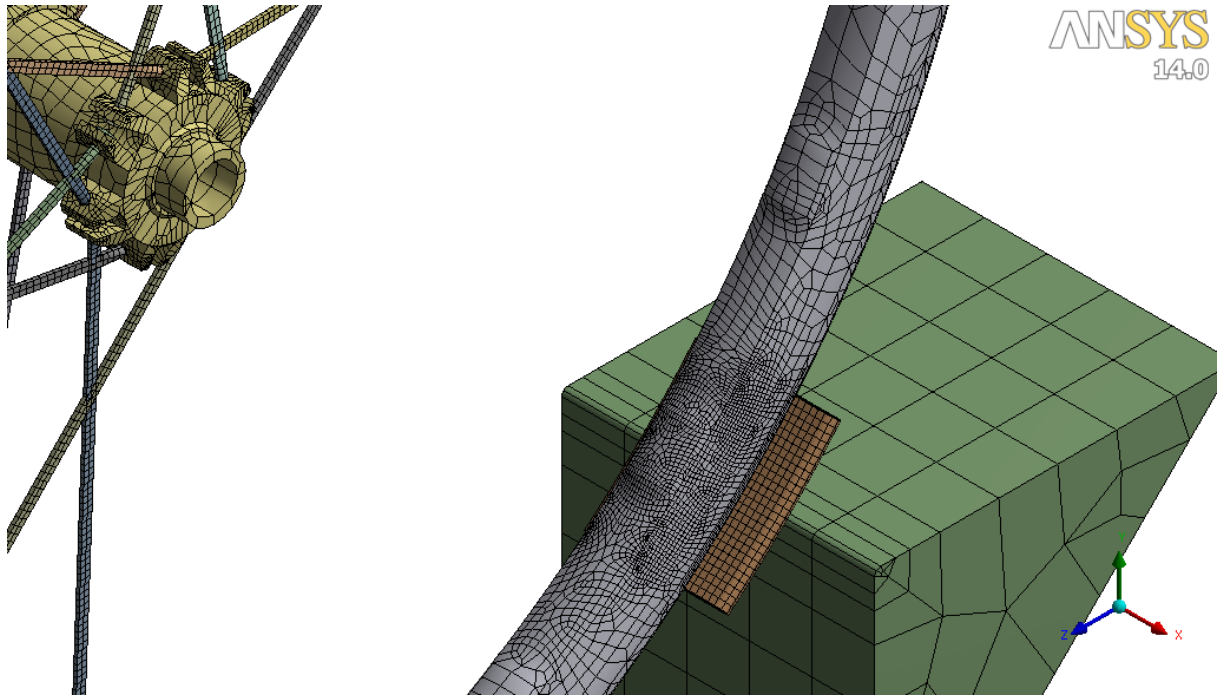


Figura 4.9: Detall del mallat en les zones més crítiques

4.5. El cas d'estudi

Un cop el model simplificat de la llanta amb el pneumàtic i l'esgraó està preparat, ja es pot dur a terme l'anàlisi en elements finits. Tot i que el cas a estudiar és un xoc, a efectes de càlcul es considera com un cas estàtic, el qual estarà format per un suport fix i una força aplicada a un punt del conjunt.

Primer de tot cal fixar l'esgraó per la part inferior d'aquest per evitar el moviment del conjunt. Tot seguit, cal aplicar la força a l'eix de la boixa. Com que es tracta d'un eix, s'ha considerat que la força s'aplica només al quadrant inferior-dret de la boixa. A la Figura 4.10 es pot veure de color verd el quadrant de la boixa al qual s'ha aplicat la força.



Figura 4.10: Quadrant de la caixa al qual s'ha aplicat la força

Com que l'esgraó està col·locat a la part inferior dreta del conjunt, la direcció de la força és de 45° , tot apuntant cap a l'esgraó. A la Figura 4.11 es pot observar el model simplificat amb les condicions de contorn ja aplicades.

B: Static Structural
Static Structural
Time: 1, s
08/08/2014 14:09
A Fixed Support
B Force: 2830, N

ANSYS
14.0

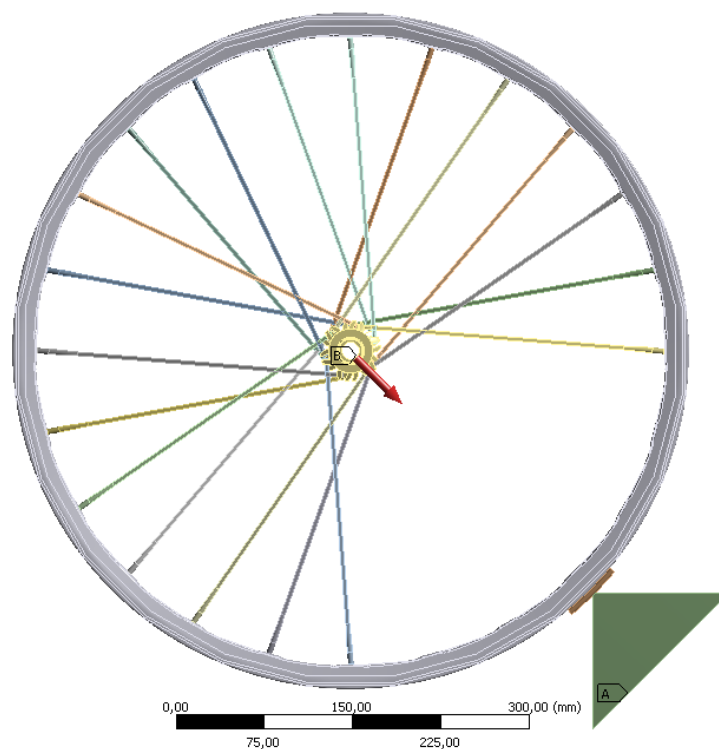


Figura 4.11: Model simplificat amb la força ja aplicada

Un cop definides les condicions de contorn de tot el conjunt, cal comprovar que els contactes entre elements són els correctes i no n'hi manca cap. En el cas d'aquest estudi s'han considerat tots els contactes com a "enganxats". Això és perfectament vàlid perquè els radis que treballaven a compressió ja han estat prèviament eliminats. En el cas que els radis no haguessin estat eliminats prèviament, una solució seria considerar que les unions dels radis amb la boixa no són fixes, sinó que permeten desplaçament en un sol sentit. A la Figura 4.12 es pot observar que el disseny de la llanta ja està fet preveient aquesta possible solució. No obstant, s'ha optat per la solució de fixar tots els elements per tal de no fer tant pesat el càlcul, ja que la opció de permetre moviment d'un element respecte d'un altre fa augmentar molt el temps de càlcul de la solució.

A més, s'han hagut d'obviar els contactes entre radis, ja que en el model dibuixat en SolidWorks sí que es superposen (Figura 4.12) però en la llanta real queden col·locats un per sobre de l'altre tot tocant-se (Figura 4.13).

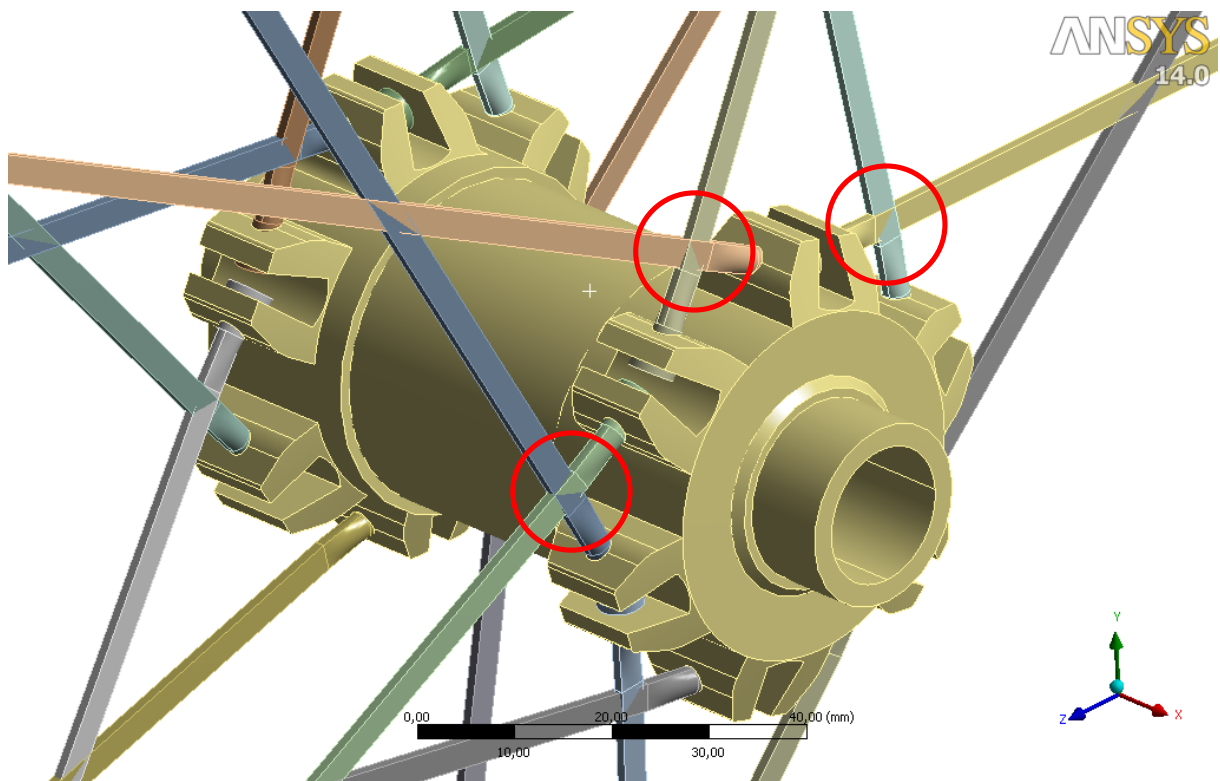


Figura 4.12: Detall de la unió dels radis amb la boixa i els contactes entre radis

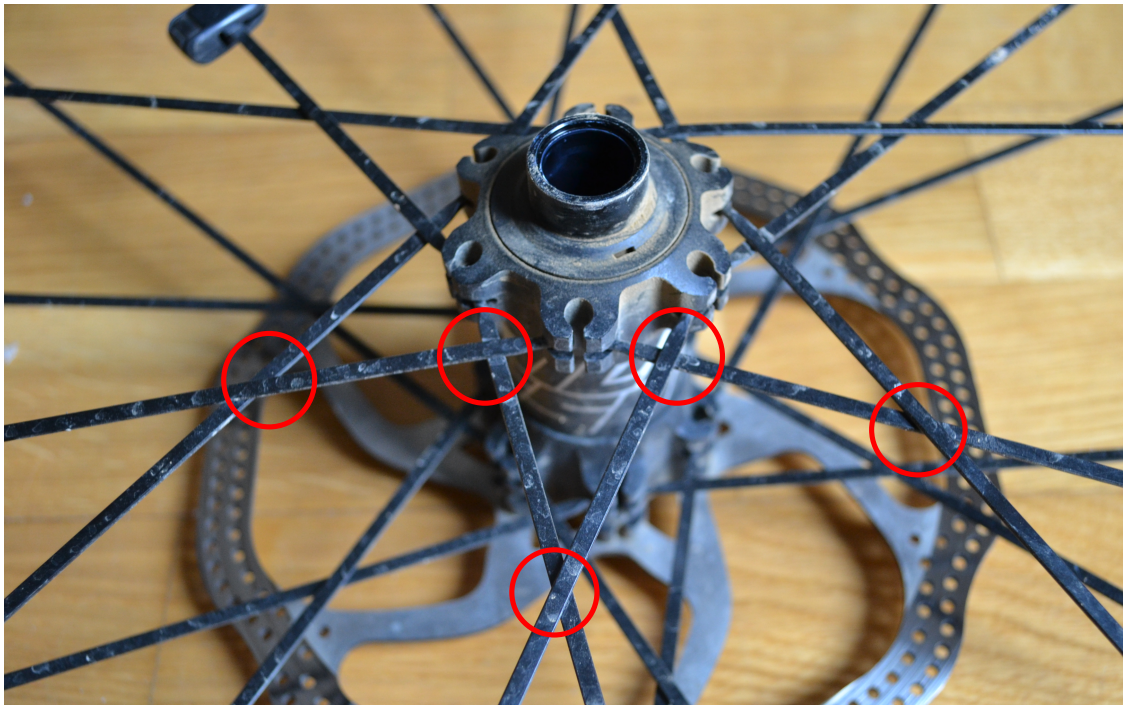


Figura 4.13: Contactes entre radis de la llanta real

Un cop fetes totes aquestes consideracions, el programa ja està preparat per trobar la solució del model.

Més endavant es faran més proves amb el programa d'elements finits ANSYS Workbench per tal de determinar la força màxima que es pot aplicar a la llanta per tal que aquesta tingui una tensió de Von Mises de 200 MPa com a màxim i així no superar el límit elàstic del material per tal que no es deformi plàsticament.

5. RESULTATS

5.1. Força d'impacte (Working Model)

Cal tenir en compte que tots els resultats del present projecte són aproximats, ja que s'han fet una sèrie d'aproximacions a l'hora de poder modelitzar la bicicleta i el ciclista. Sinó, no hagués estat possible fer-ne la modelització i posterior simulació amb el programa Working Model.

En aquest apartat només interessa el valor de la força màxima en el moment d'impacte. Aquesta força serà la utilitzada posteriorment al programa d'elements finits per a fer l'anàlisi tensional de la llanta.

A la Figura 5.1 es pot veure l'instant en el qual es produeix la força màxima sobre la caixa, la qual té un valor de **2830 N**. Aquesta força es produeix sobre la roda del davant, ja que és la primera que rep l'impacte i, per tant, la que impacta a més velocitat contra l'esgraió. La força màxima d'impacte sobre la caixa del darrere és molt més inferior, amb un valor d'uns 1250 N aproximadament.

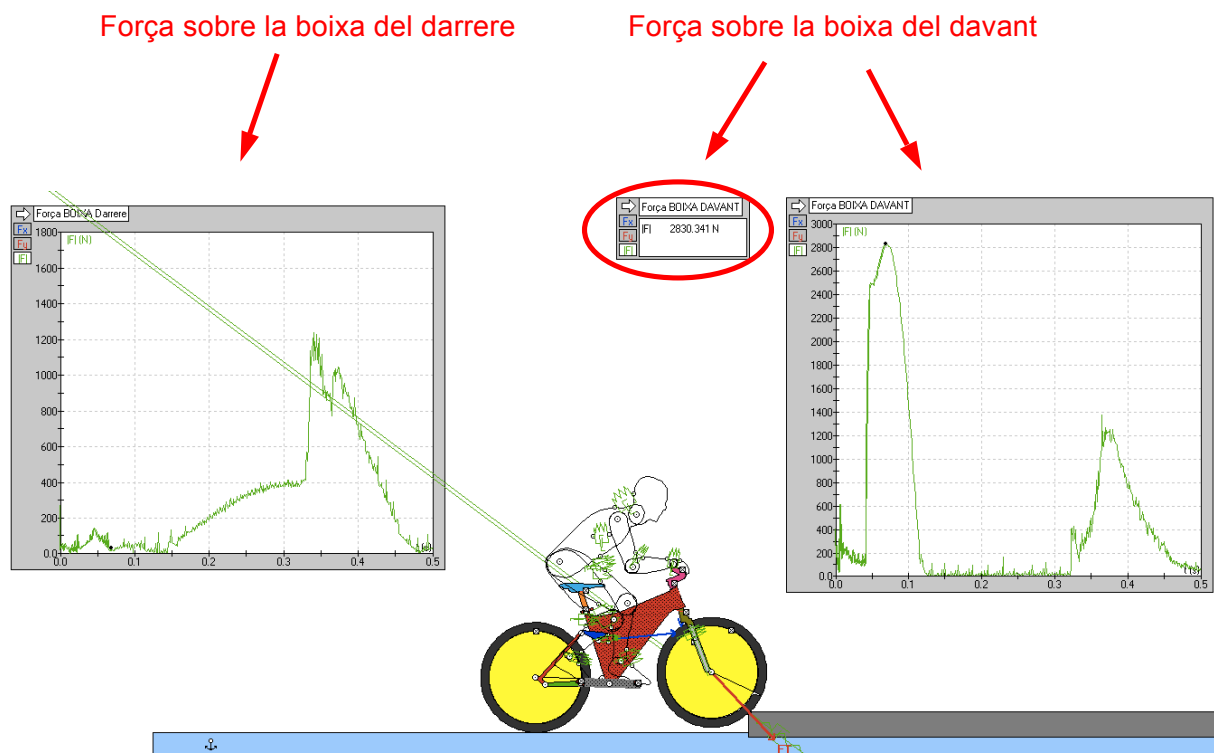


Figura 5.1: Instant en què es produeix la força màxima

Tal com es veu a la figura anterior, queda corroborat que en l'instant de temps en el que es produeix aquesta força màxima, la direcció d'aquesta força coincideix amb l'aresta de l'esgraó.

5.2. Tensions a la llanta (elements finits – ANSYS)

Per tal d'analitzar l'estructura de la llanta primer de tot interessa saber les tensions de Von Mises de tot el conjunt (Figura 5.2). En aquest cas, a més, s'ha augmentat l'escala de deformació per apreciar millor la deformació que pateix la llanta.

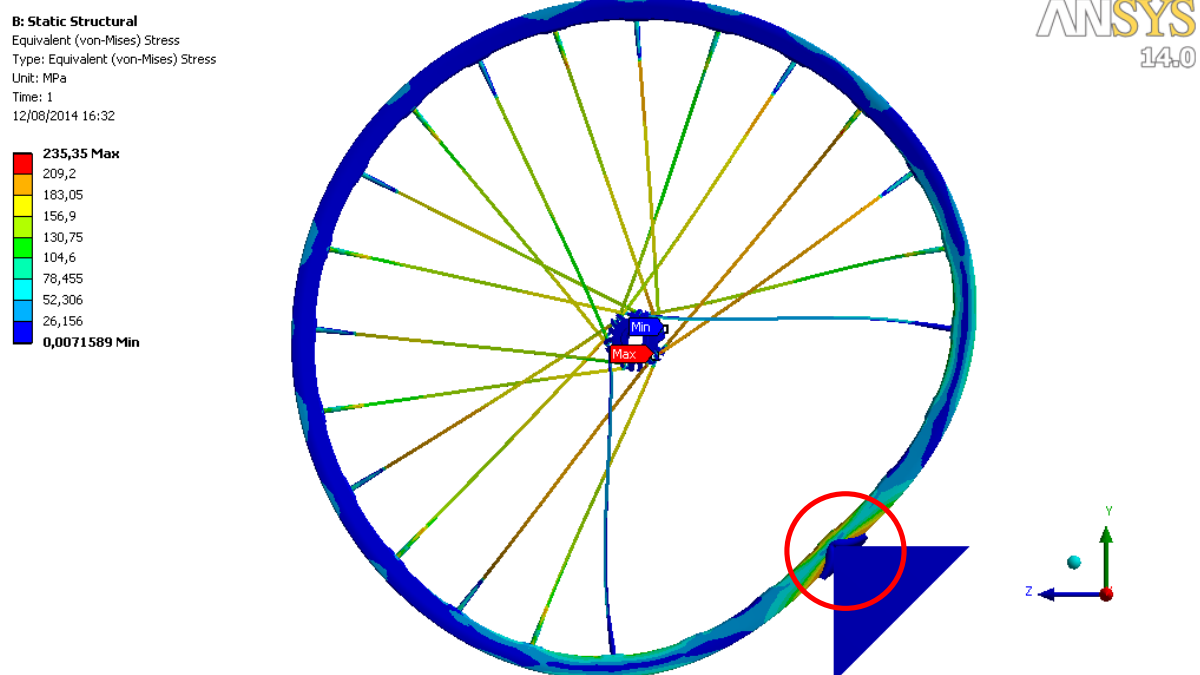


Figura 5.2: Tensions de Von Mises de tot el conjunt

Tal com es pot observar, la tensió màxima està situada en un radi. No obstant, aquesta tensió està en el punt on el radi s'uneix amb la boixa i el radi pateix un canvi de secció, per tant es crea una concentració de tensions. A més, cal tenir en compte que els radis de la llanta real estan pretesats, i això no ha estat considerat així en l'anàlisi teòric dut a terme amb el programa d'elements finits. Així doncs, no es tindran en compte els punts crítics d'estudi dels radis.

A la figura anterior també es pot observar que hi ha una zona crítica a l'anell de la llanta, a la zona que està en contacte amb l'esgraó (assenyalat en vermell a la Figura 5.2). A la Figura 5.3 es poden observar les tensions de Von Mises de l'anell de la llanta en concret.

B: Static Structural
 Equivalent (von-Mises) Stress - llanta-1
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 11/08/2014 22:15

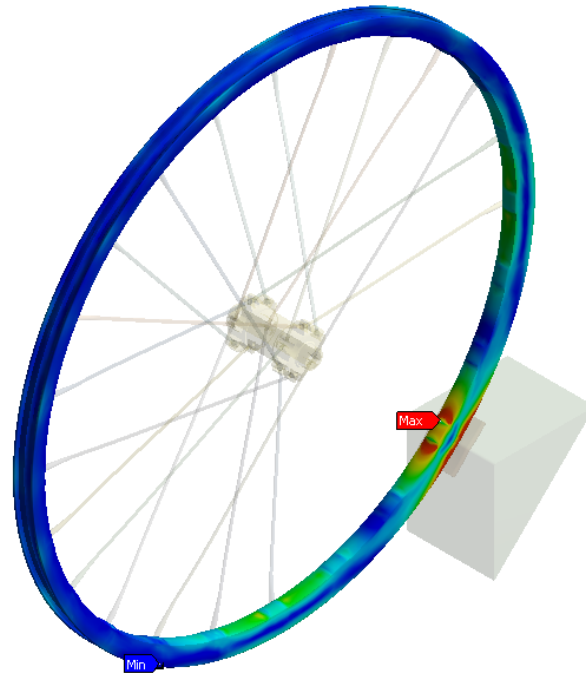
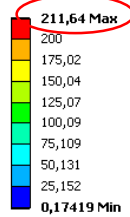


Figura 5.3: Tensions de Von Mises de l'anell de la llanta

Tal com s'observa a la figura anterior, el valor màxim de tensió de Von Mises és de 211,64 MPa. Com que aquest valor és superior al límit elàstic de l'alumini 6106 de la llanta, en certs punts s'arribarà a produir una deformació plàstica permanent de la llanta. De color vermell hi ha representades les tensions superiors a 200 MPa, és a dir, superiors al límit elàstic del material suposat. A la Figura 5.4 es pot observar que hi ha punts crítics tant a la part inferior (on hi ha contacte amb el pneumàtic) com a la part superior (on hi van enganxats els radis). Això és degut a que la llanta es pot entendre com una biga corba que treballa a flexió, de manera que la part superior treballa a tracció i la inferior treballa a compressió.

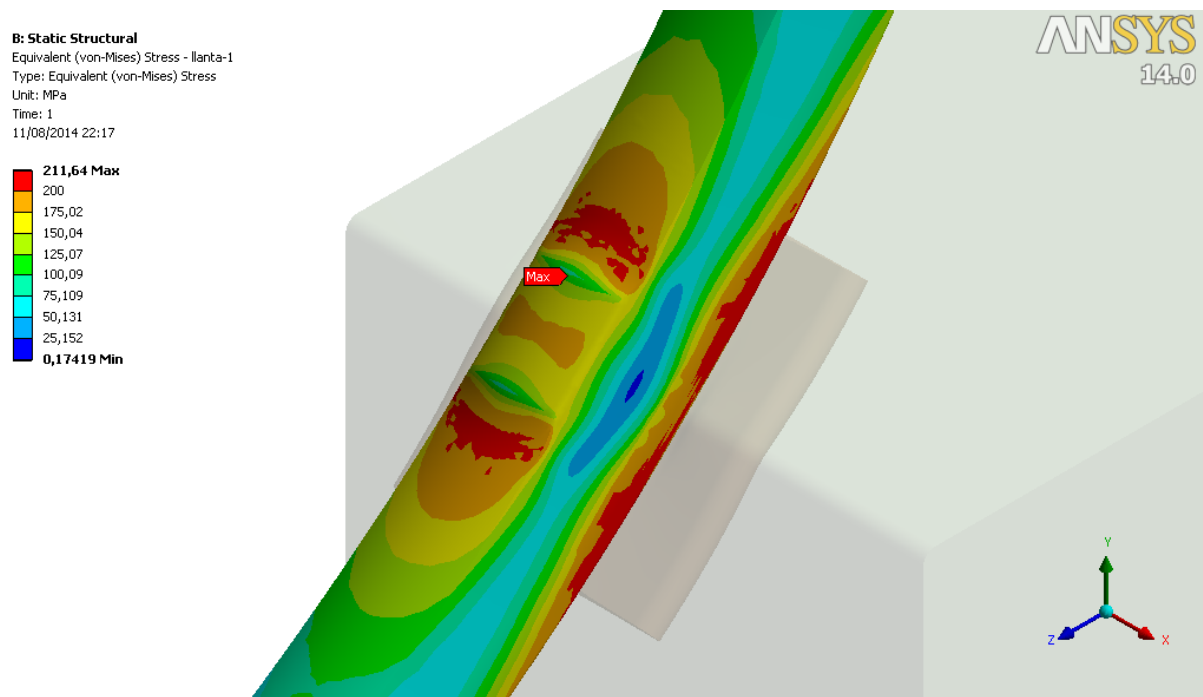


Figura 5.4: Detall de les tensions de Von Mises a l'anell de la llanta

A la vista en secció (Figura 5.5) es pot corroborar que les tensions més elevades es troben clarament a la part superior i inferior de l'anell. No obstant, al tractar-se de les tensions de Von Mises, totes tenen signe positiu i no es pot diferenciar les de tracció de les de compressió.

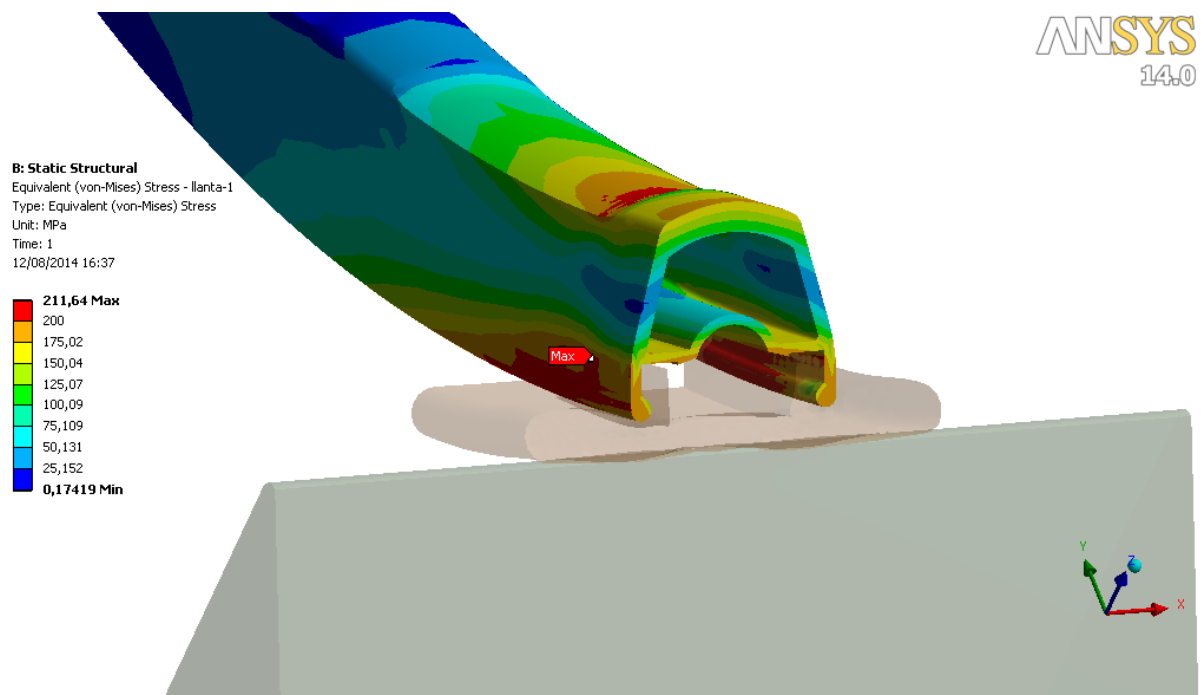


Figura 5.5: Secció de les tensions de Von Mises a l'anell de la llanta

A més, cal tenir en compte que a la part inferior s'hi produirà un altre esforç extra a part de la flexió: la pressió exercida per l'esgraó a través del pneumàtic, anomenada tensió de contacte de Hertz. Per tal de saber quina part de la tensió és en la direcció radial i quina part de la tensió és en la direcció tangencial, el programa ANSYS permet extreure les dades de tensions normals segons uns eixos prèviament determinats.

Les tensions normals segons l'eix radial (Figura 5.6) tenen un valor màxim de 110,9 MPa i un valor mínim de -235,07 MPa.

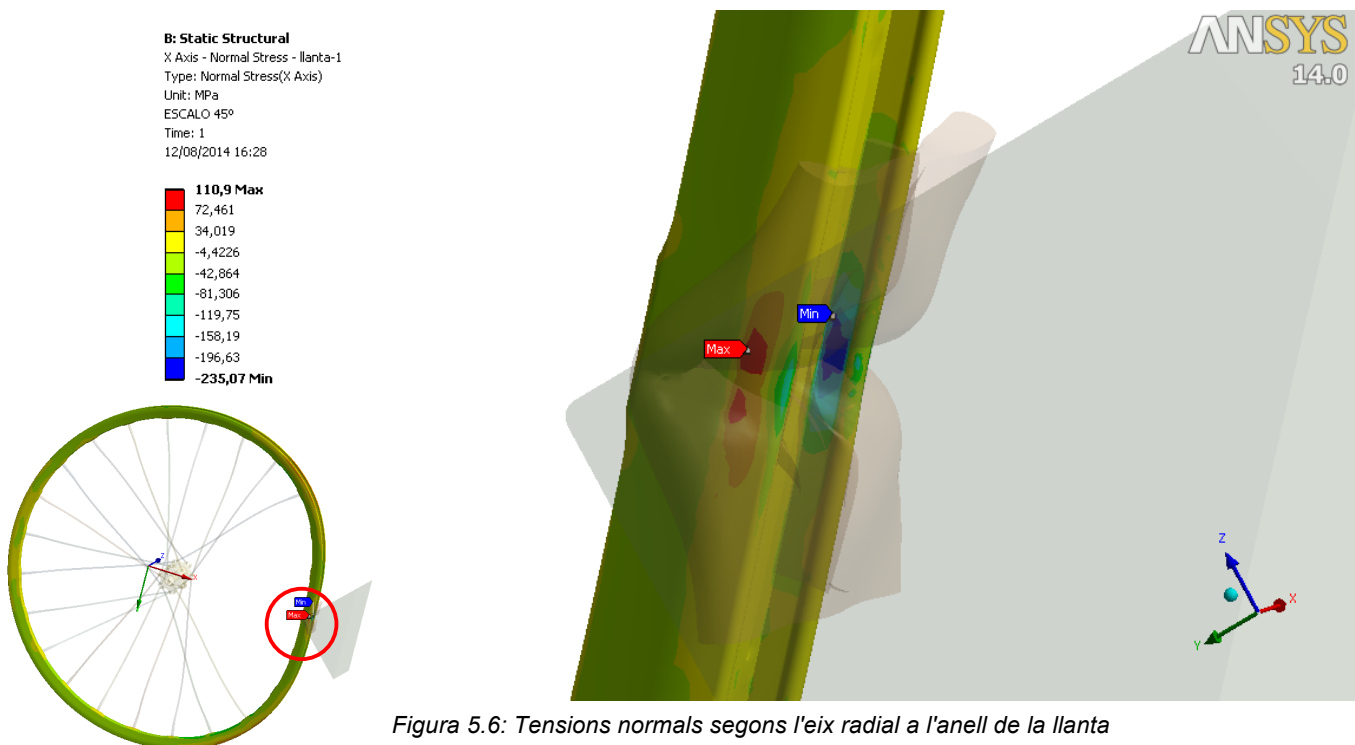


Figura 5.6: Tensions normals segons l'eix radial a l'anell de la llanta

A la part interior de la llanta (on es produeix la tensió de compressió), la tensió serà més del doble que a la part exterior (on es produeix la tensió de tracció).

Tal com són les tensions, es pot deduir que en cas que es produeixi deformació en aquesta part de la llanta, quedarà doblegada de manera que la part que està en contacte amb el pneumàtic tendirà a ajuntar-se lleugerament. A la Figura 5.7 es pot observar aquesta situació.

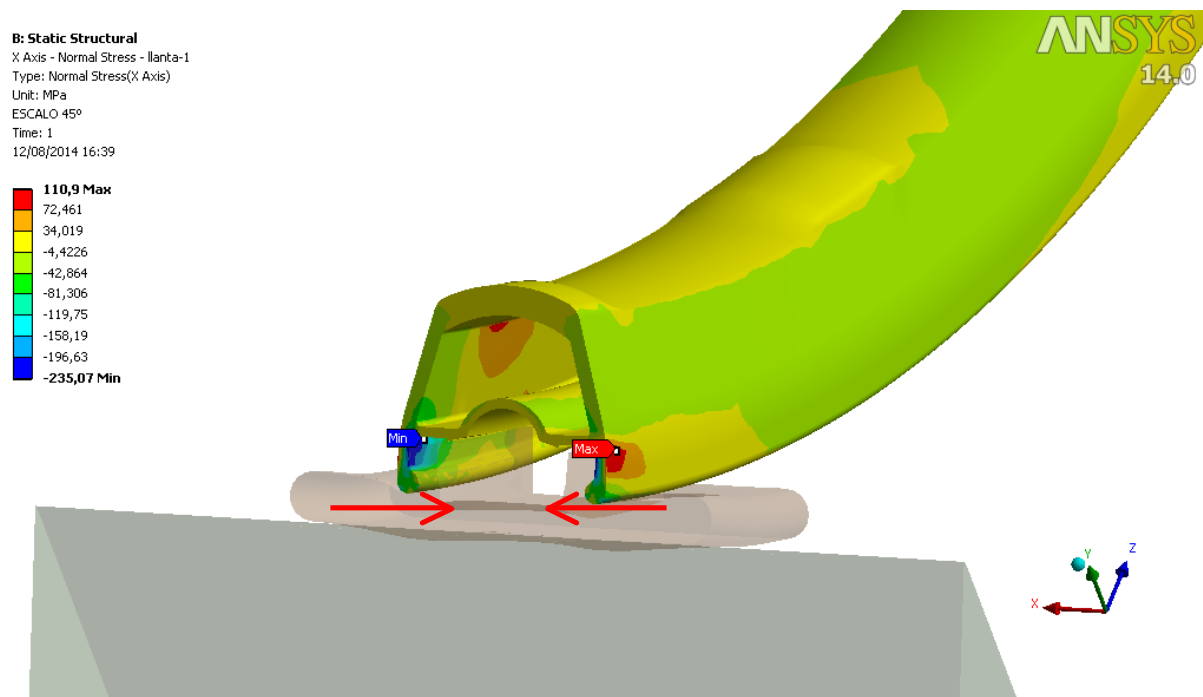


Figura 5.7: Secció de les tensions normals segons l'eix radial a l'anell de la llanta

Les tensions normals segons l'eix tangencial de la llanta són les produïdes per la flexió (cal entendre la llanta com una biga corba a la que se li aplica una força). A la Figura 5.8 es pot observar que aquest fenomen crea unes tensions de tracció (signe positiu) a la part superior de la llanta i unes tensions de compressió (signe negatiu) a la part inferior d'aquesta.

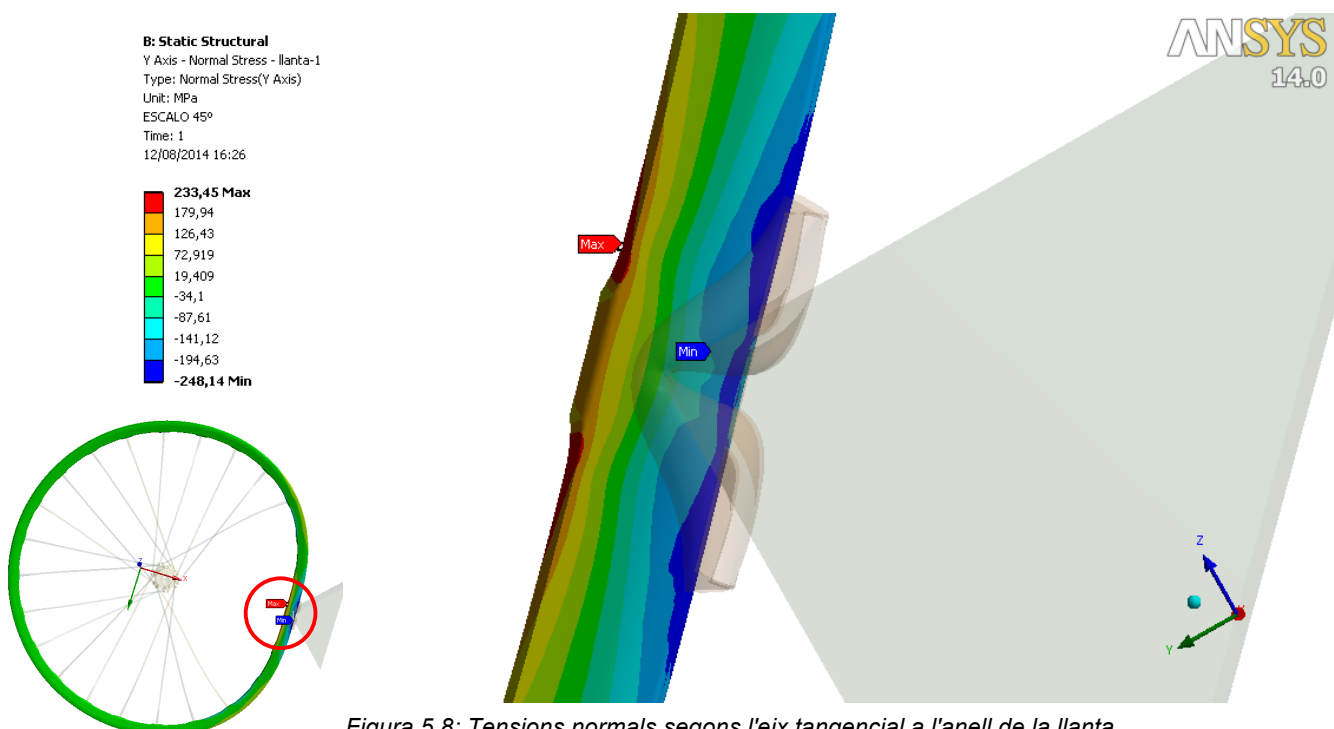


Figura 5.8: Tensions normals segons l'eix tangencial a l'anell de la llanta

La tensió màxima (tracció) en aquesta direcció pren un valor de 233,45 MPa i la tensió mínima (compressió) pren un valor de -248,14 MPa. A la Figura 5.9 es pot observar que existeix un punt de la secció de la llanta on no hi ha efecte de tracció ni compressió, és a dir, la línia neutra.

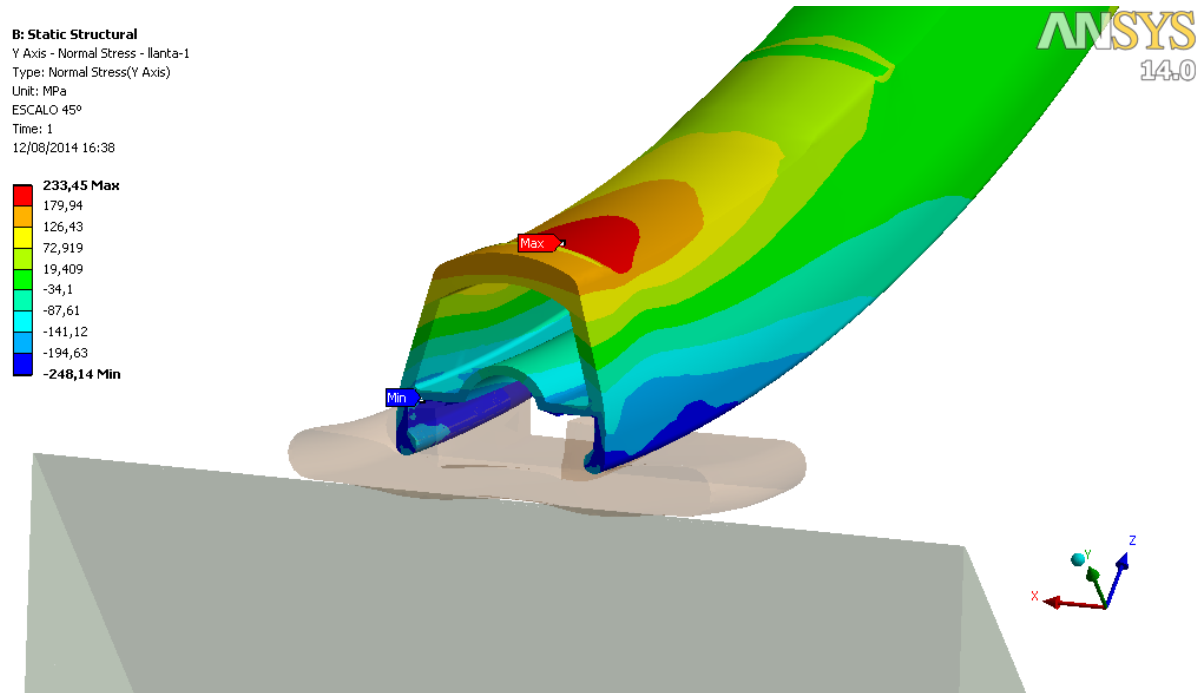


Figura 5.9: Secció de les tensions normals segons l'eix tangencial a l'anell de la llanta

Tal com s'ha vist, en diversos casos la tensió supera el límit elàstic del material, el qual és de 200 MPa. Per tant, en alguns punts es produirà una deformació plàstica i permanent de la llanta. Per tal d'estudiar-ho, el programa ens permet obtenir la deformació unitària plàstica equivalent (Figura 5.10).

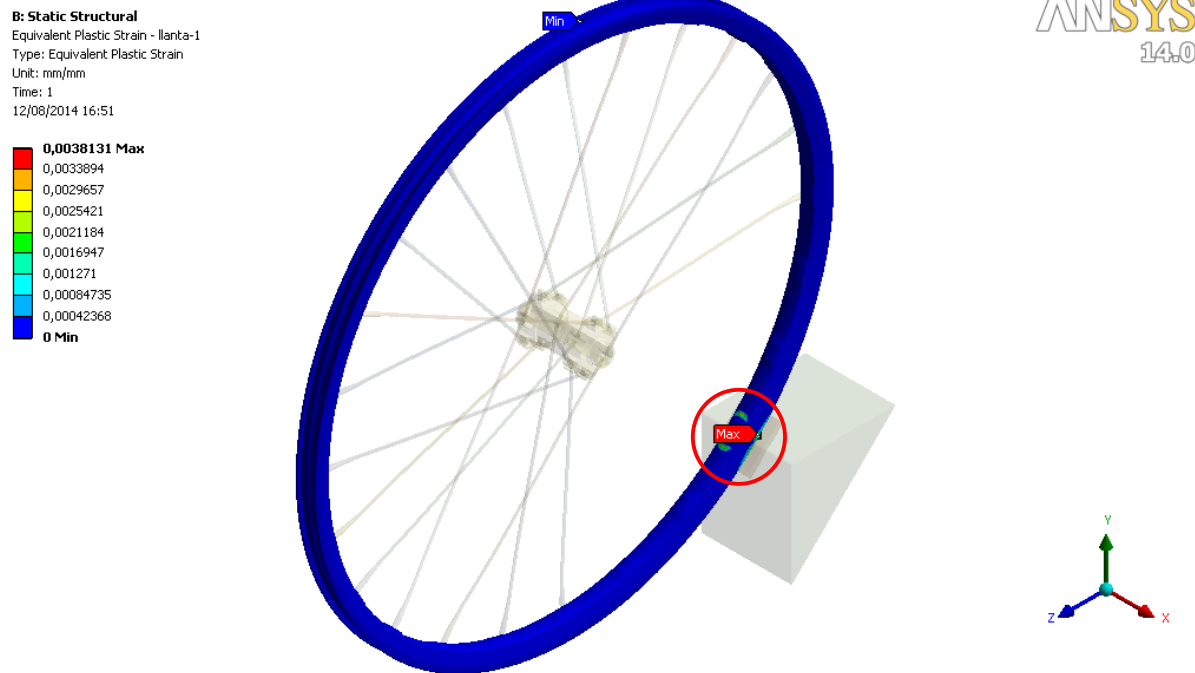


Figura 5.10: Deformació unitària plàstica equivalent a l'anell de la llanta

El primer que s'observa a la figura anterior és que la major part de la llanta té una deformació de zero (color blau fosc). La zona més crítica és la zona més propera a l'esgraó (assenyalat en vermell), que ja s'ha vist que és on es produeixen les tensions més grans de tot el conjunt. A la Figura 5.11 i a la Figura 5.12 es pot observar la deformació unitària plàstica equivalent en aquesta zona.

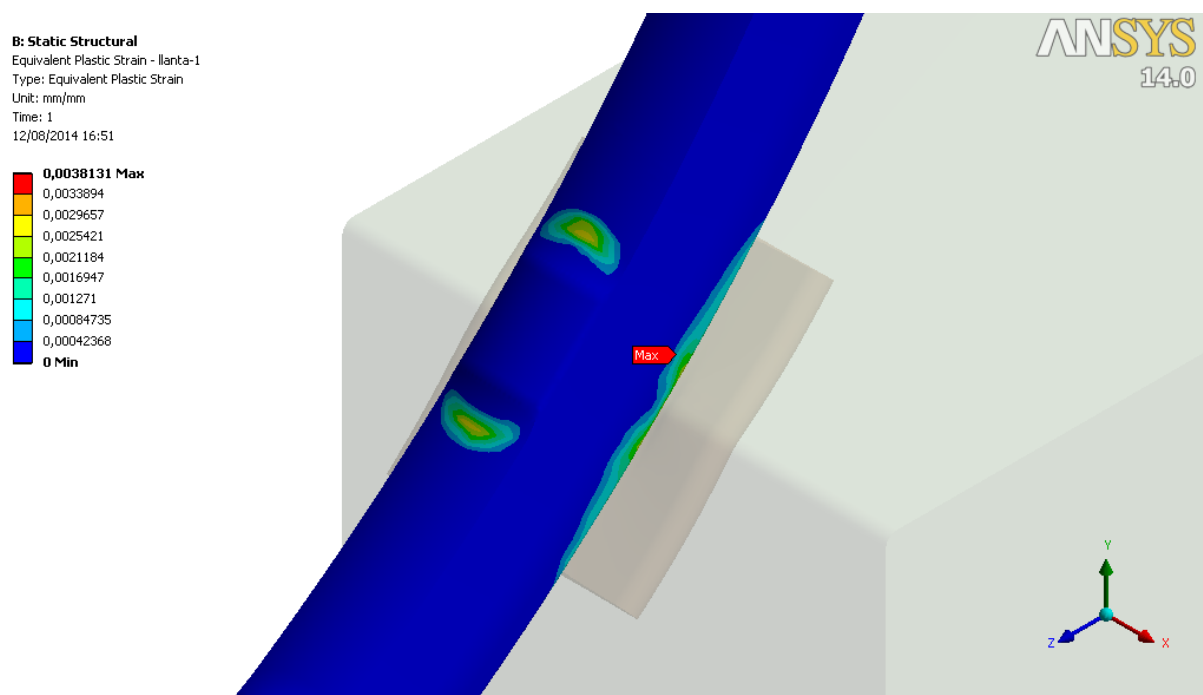


Figura 5.11: Deformació unitària plàstica equivalent de la part superior de l'anell de la llanta

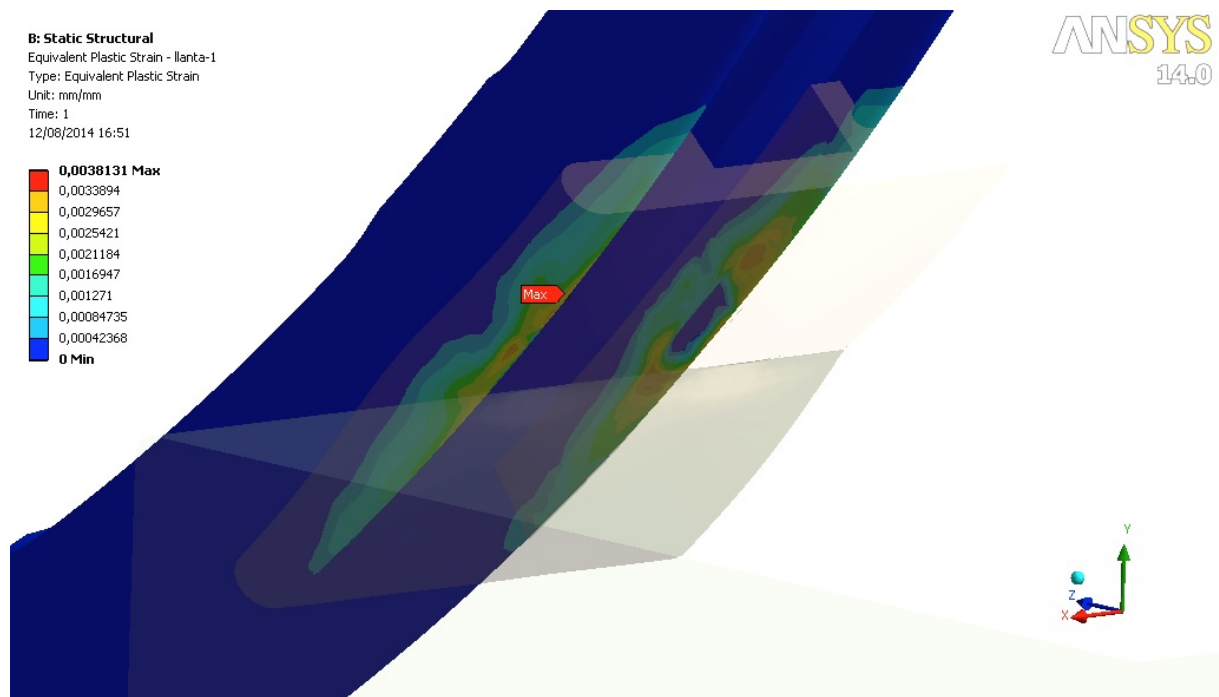


Figura 5.12: Deformació unitària plàstica equivalent de la part inferior de l'anell de la llanta

Tal com es pot observar, el valor màxim està situat a la part inferior de l'anell de la llanta, i pren un valor de 0,0038131, és a dir, un 0,38% aproximadament.

Un cop estudiades les tensions de la llanta, es podrien proposar les possibles millores següents:

1. **Augmentar el cantell de la secció de la llanta:** si s'augmentés el cantell de l'anell de la llanta (Figura 5.13) les tensions segons l'eix tangencial a l'anell de la llanta disminuirien considerablement, ja que la inèrcia de la secció augmentaria i aquesta és inversament proporcional a la tensió.

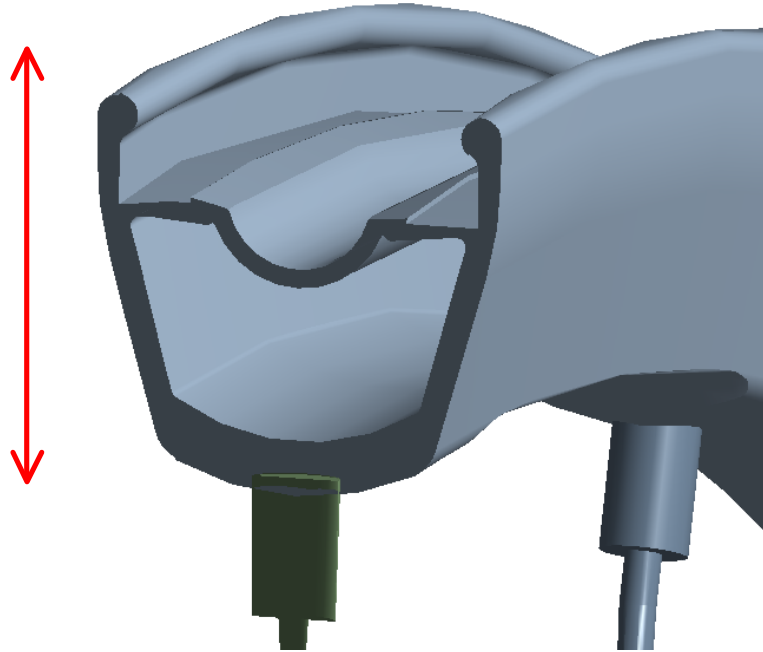


Figura 5.13: Possible millora 1: Augmentar el cantell de la secció de la llanta

2. **Augmentar l'àrea de la secció més crítica:** tal com s'ha vist anteriorment, la secció més crítica de l'anell de la llanta és la secció assenyalada a la Figura 5.14. Si s'augmentés l'amplada d'aquesta secció s'aconseguirien unes tensions inferiors, sobretot a les tensions segons l'eix radial a l'anell de la llanta.

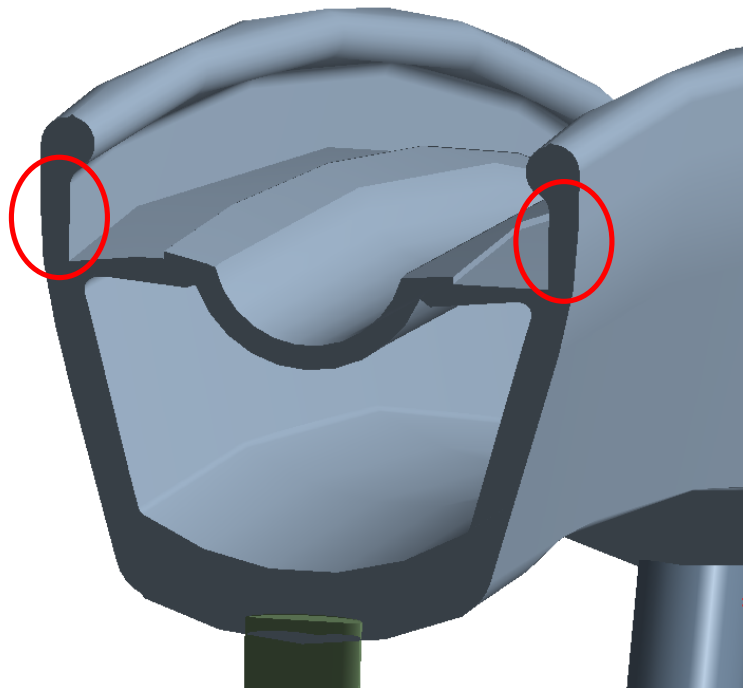


Figura 5.14: Possible millora 2: Augmentar l'àrea de la secció més crítica

5.3. Estudi del cas límit

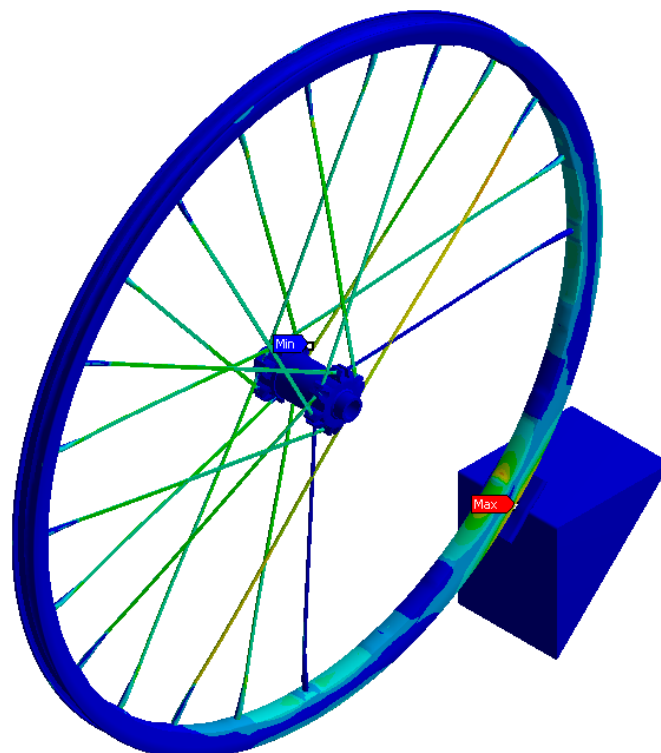
En aquest apartat s'estudia la velocitat màxima a la qual pot circular la bicicleta per tal que les tensions de Von Mises de l'anell de la llanta no superin el límit elàstic del material, el qual està fixat en 200 MPa.

Per tal de fer-ho, s'ha de fer el procediment anterior però a la inversa, és a dir, primer de tot amb el programa d'elements finits ANSYS Workbench s'haurà de trobar la força que s'ha d'aplicar a la caixa perquè la tensió màxima de Von Mises sigui de 200 MPa. Tot seguit, amb el programa de simulació Working Model, s'haurà de buscar amb quina velocitat s'assoleix la força anteriorment trobada. Aquesta velocitat serà la velocitat límit a la qual es podrà impactar contra l'esgraó sense que es produeixi deformació plàstica a l'anell de la llanta.

Per trobar la força que provoca una tensió de Von Mises de 200 MPa, s'ha treballat només amb la part elàstica de l'alumini, considerant el mateix mòdul elàstic que a la resta del projecte. Amb aquestes característiques, i aplicant la força de 2830 N que s'ha utilitzat prèviament, s'aconsegueix una tensió màxima de 337,97 MPa (Figura 5.15).

B: Static Structural
Equivalent (von-Mises) Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
24/08/2014 17:43

337,97 Max
300,42
262,87
225,32
187,77
150,21
112,66
75,11
37,559
0,0069004 Min



ANSYS
14.0

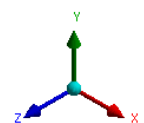


Figura 5.15: Tensions de Von Mises considerant només la part elàstica de l'alumini

Sabent aquest valor de tensió de von Mises produïda per la força de 2830 N, es pot calcular la força que cal aplicar per obtenir una tensió màxima de 200 MPa, ja que la força és directament proporcional a la tensió obtinguda. El valor d'aquest càlcul dóna 1674 N. A la Figura 5.16 es pot comprovar que aplicant aquesta força al programa, la tensió màxima té un valor de 200 MPa.

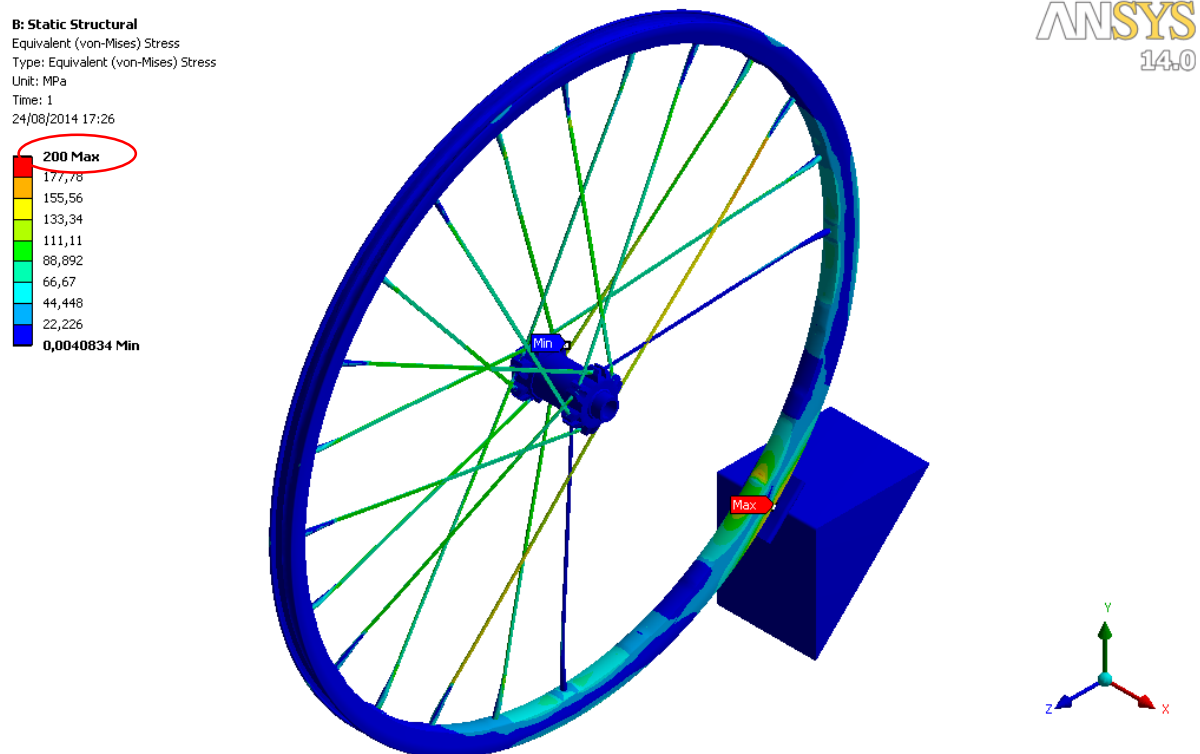


Figura 5.16: Tensions de Von Mises aplicant una força de 1674 N

Un cop coneguda la força màxima que s'ha de produir sobre la llanta, amb el programa Working Model cal trobar la velocitat a la que ha de circular la bicicleta per tal que la força màxima tingui aquest valor de 1674 N. A la Figura 5.17 es pot observar el cas en el què això es produeix. La velocitat inicial de la bicicleta és d'uns 9,3 km/h.

En aquest cas que la bicicleta circula a 9,3 km/h, finalment la bicicleta no acaba de pujar l'esgraó amb totes dues rodes, sinó que es queda amb la roda davantera a dalt de l'esgraó i la posterior a baix. Això és degut a que el cas estudiat és amb el ciclista totalment rígid i només governat pels ressorts i amortidors, cosa que no és mai així a la realitat. Per tant, els resultats obtinguts són aproximats i no són totalment exactes, ja que s'han hagut de fer algunes consideracions per tal de poder dur a terme la simulació amb el programa Working Model.

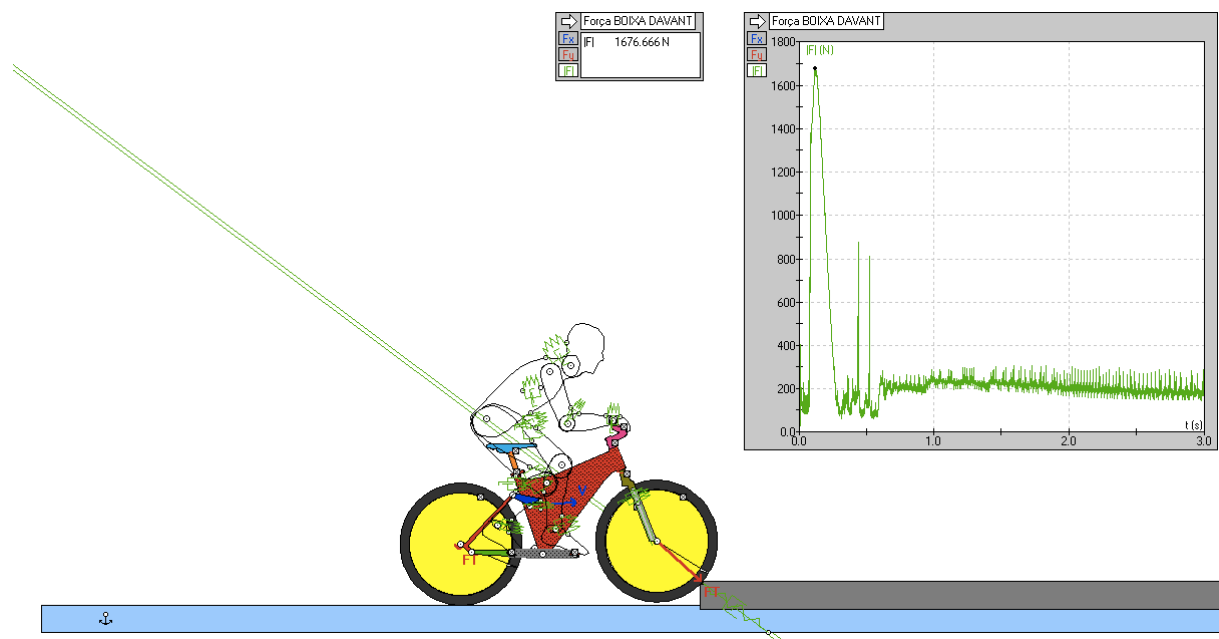


Figura 5.17: Cas en el qual es produeix la força màxima a la qual no es sobrepassa el límit elàstic de l'alumini

6. RESUM DEL PRESSUPOST

El present projecte no conté pressupost, ja que no comporta la construcció ni la fabricació de cap element material.

7. CONCLUSIONS

Des de l'inici fins al final del present projecte, s'han anat assolint els objectius inicialment proposats i, en general, els resultats obtinguts han estat bons i propers als esperats.

S'ha aconseguit crear un model bastant real de la bicicleta i del ciclista per a posteriorment simular-los amb el programa Working Model. La simulació en un entorn amb un obstacle en complicava la modelització, ja que la bicicleta, i sobretot el ciclista, actuen diferent en funció del terreny en el qual es troben. En aquest aspecte s'ha intentat crear un model el màxim real possible, tot i que a la realitat el ciclista no està mai a la mateixa posició i exerceix una força diferent sobre la bicicleta en cada moment.

La modelització de la llanta ha sigut en general molt acurada, tot i que pel pneumàtic s'ha optat per usar un material lineal en comptes d'un material híper-elàstic. Això s'ha fet així per tal d'alleugerir el càlcul del programa d'elements finits i simplificar el comportament del material. A més, hagués resultat molt complicat modelitzar el material del pneumàtic segons les seves propietats exactes, i l'efecte que això hagués comportat sobre la llanta en sí hagués estat pràcticament imperceptible.

Els resultats obtinguts amb un esgraó de 15 cm i una velocitat inicial de la bicicleta de 5 m/s (18 km/h) són bastant bons. En la major part de l'anell de la llanta, la tensió equivalent de Von Mises es manté per sota del límit elàstic del material (200 MPa), i només supera aquest valor en la zona on hi ha el contacte amb l'esgraó. Tant en la direcció radial com en la direcció tangencial, les tensions normals tenen valors similars, per tant no es pot considerar que una direcció sigui més crítica que l'altra.

Per tant, sí que es produirà deformació plàstica de l'anell de la llanta, però en molt pocs punts. En cap cas s'arribarà a produir el trencament d'aquesta.

En l'estudi de la velocitat màxima a la qual pot circular la bicicleta perquè no es produeixi deformació plàstica de la llanta, s'ha obtingut un resultat de 9,3 km/h, bastant raonable tenint en compte els resultats prèviament obtinguts.

Alguns dels possibles treballs que es podrien fer per a continuar amb aquest estudi són:

1. Estudi de la llanta abans que s'arribi a produir el "llantasso". Analitzar quin efecte té l'aire dins la llanta i com són les tensions a la llanta abans d'arribar a aquest estat. A més, es podria estudiar com influeix la pressió de l'aire del pneumàtic en l'impacte.
2. Valorar quantitativament la deformació plàstica produïda a la llanta després de l'impacte i si aquesta és molt important per mantenir el bon funcionament del conjunt de la llanta de la bicicleta.
3. Importància del diàmetre de la roda en les tensions produïdes al pujar un esgraó. En aquest projecte ja s'ha citat que les rodes de mida més gran (27,5 i 29 polzades) tenen unes tensions inferiors quan s'impacta amb un esgraó d'una mida determinada. No obstant, es podria estudiar si aquesta diferència és molt gran o és poc significativa.
4. Estudi de diverses llantes, en funció de la modalitat per a la qual han estat dissenyades (Cross-Country, descens, etc.). En un principi les llantes destinades a la pràctica del descens haurien de ser més resistents i preparades per rebre forts impactes.

Girona, 4 de setembre de 2014

8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present estudi consta dels següents documents:

Document 1: Memòria i annexos

Annex A: La bicicleta i el ciclista

Annex B: La simulació en Working Model

Annex C: L'anàlisi de tensions en elements finits (ANSYS)

Document 2: Pressupost

9. BIBLIOGRAFIA

BRUJATS, M. Determinació de les tensions màximes en quadres de bicicleta. Projecte/Treball Fi de Carrera. Enginyeria Tècnica Mecànica Industrial. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Setembre 2010.

GUILLAMET, G. Pèrdua d'energia de pedalada en una MTB de doble suspensió. Projecte/Treball Fi de Carrera. Enginyeria Industrial. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Juny 2008.

ANNEX A: LA BICICLETA I EL CICLISTA

A.1. La bicicleta: Canyon Nerve AL 8.0

La bicicleta estudiada en aquest projecte és una bicicleta de la marca alemanya Canyon. Aquesta marca té la peculiaritat que només ven les seves bicicletes via internet, no té cap botiga física fora d'Alemanya. Així doncs, aquestes bicicletes presumeixen d'una bona relació qualitat-preu, alhora que tenen un disseny molt estimat pels usuaris d'aquest esport.

El model d'aquest estudi és el Nerve AL 8.0, de l'any 2013. Es tracta d'una bicicleta de doble suspensió feta d'alumini. Dins de la gamma d'alumini es troba en una gamma mitjana, tot i que consta de bons components en comparació amb bicicletes d'un preu similar d'altres marques que es poden trobar al mercat.

Degut que en el present projecte s'ha realitzat amb un ciclista de 1,70 metres d'altura, s'ha escollit la bicicleta en la seva talla més petita (S). A la Figura A.1.1 es poden observar les principals mides d'aquest model concret i en aquesta talla.

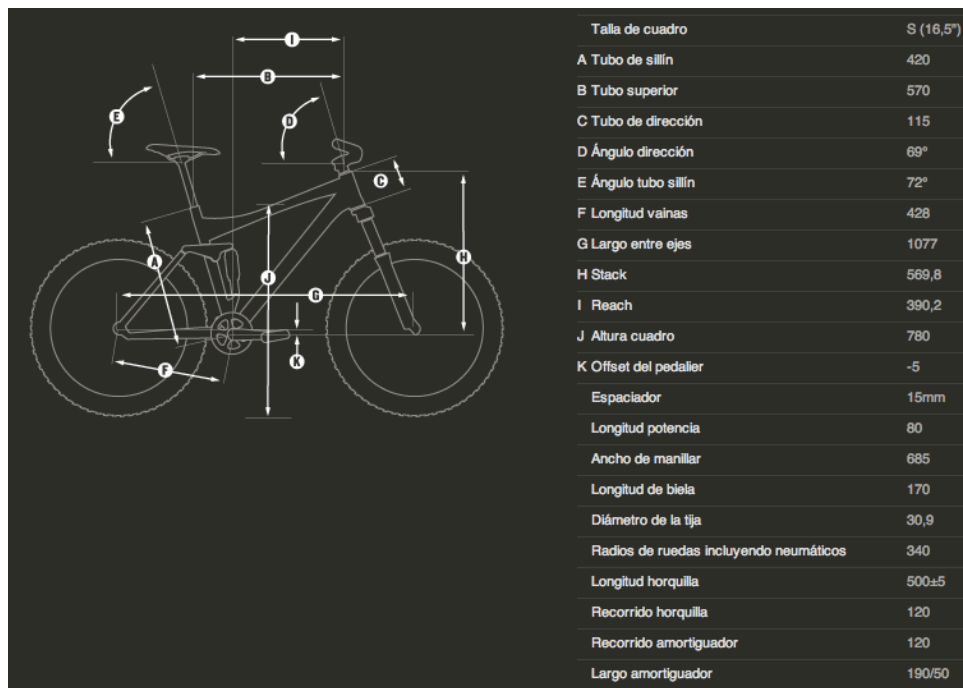


Figura A.1.1: Principals dimensions de la bicicleta Canyon Nerve AL 8.0 en talla S

Aquesta bicicleta té un pes total de 11,9 kg sense pedals, segons dades del fabricant. A partir els components de la bicicleta recollits en la Figura A.1.2 i donat que s'han escollit uns pedals Shimano XT per a realitzar l'estudi, s'ha considerat que la masses aproximades de cadascun dels components de la bicicleta són les recollides a la Taula A.1.1.

































	Cuadro	Canyon Nerve AL		Potencia	Iridium SL
	Amortiguador	Fox Float CTD Performance BV		Manillar	Iridium SL 680mm
	Horquilla	Fox 32 Float CTD FIT Performance		Puños	Canyon Puños
	Dirección	Acros ADX-03		Sillín	Selle Italia X1
	Cambio trasero	Shimano XT RD-M786		Tija de sillín	Iridium SL
	Desviador	Shimano Deore XT E-Type		Pedales	No incluidos
	Mandos cambio	Shimano Deore XT RapidFire Plus		Tallas de cuadro	S, M, L, XL
	Manetas freno	Avid Elixir 5		Color	deep black ano - grey
	Frenos	Avid Elixir 5			icon grey
	Bujes	Mavic Crosstrail		Peso	11,90 kg
	Casete	Shimano SLX 11-36 10-speed			
	Llantas	Mavic Crosstrail		Incluido en el envío	
	Neumáticos	Schwalbe Nobby Nic 2,25"		Herramientas	Canyon Llave dinamométrica Torque
	Bielas	Shimano Deore XT FC-M780		Bomba	Canyon Bomba de presión
	Piatos	42/32/24		Manual	Canyon Manual MTB
	Pedalier	Shimano Deore XT		Sujeto a modificaciones técnicas sin previo aviso. Salvo error u omisión.	

Figura A.1.2: Components de la bicicleta Canyon Nerve AL 8.0

PART	MASSA (kg)
Quadre + parts	5,000
Llanta del davant	0,800
Llanta del darrere	0,850
Coberta del davant	0,545
Coberta del darrere	0,545
Forquilla	1,500
Amortidor del darrere	0,250
Casset	0,350
Manillar + potència	0,600
Tija	0,350
Seient	0,250
Bieles	0,860
Pedals	0,343
TOTAL	12,243

Taula A.1.1: Massa de cada component de la bicicleta Canyon Nerve AL 8.0

No obstant, a l'hora d'introduir aquestes masses a les corresponents parts del Working Model, s'han hagut de dividir algunes d'aquestes parts per tal de què cada part tingués la seva pròpia massa. Aquests valors es poden observar a la Taula A.1.2.

PART	MASSA (kg)
Quadre	4,000
Tirants	0,400
Baines	0,400
Basculant	0,450
Llanta del davant	0,800
Llanta del darrere	1,200
Coberta del davant	0,545

Coberta del darrere	0,545
Part superior forquilla	0,750
Part inferior forquilla	0,750
Manillar + potència	0,600
Tija	0,350
Seient	0,250
Bieles	0,860
Pedal 1	0,172
Pedal 2	0,172
Total	12,243

Taula A.1.2: Massa associada a cada part del programa Working Model

La suspensió de la bicicleta té una gran importància en aquest estudi, ja que és la responsable d'amortir l'impacte produït i disminuir la força resultant creada sobre la llanta. La bicicleta estudiada munta suspensions de la marca FOX, les quals destaquen per la seva suavitat i comoditat envers el ciclista. A més, aquestes suspensions admeten moltes configuracions per tal d'adaptar-se a cada ciclista, ja sigui al pes d'aquest i també al comportament que desitgi. Per tal de calibrar les suspensions es pot fer de diverses maneres. Bàsicament es poden modificar dos paràmetres: l'aire contingut dins l'amortidor i el rebot d'aquest. L'aire comprimit contingut dins l'amortidor és el principal component que en fa variar el seu comportament. Principalment la pressió a la que ha d'estar comprimit l'aire depèn del pes del ciclista; a més pes del ciclista, més pressió haurà de tenir l'aire de l'amortidor.

Per tal de determinar la pressió de l'aire contingut a l'amortidor es fer de dues maneres:

1. A partir d'unes taules on s'indiqui el pes del ciclista i, seguidament, la pressió d'aire necessària de l'amortidor. Aquest el mètode més simple. A vegades aquest mètode no és possible perquè molts amortidors no disposen d'aquesta taula.
2. A partir del mètode SAG. Aquest mètode consisteix en calibrar les suspensions en repòs i amb el ciclista damunt la bicicleta. En aquest estat, es considera que la suspensió ha d'estar enfonsada un percentatge determinat; normalment entre el 20 i el 30%, depenent de la duresa que se li vulgui donar a la suspensió en concret. Així doncs, es va

augmentant o disminuint la pressió de l'aire fins a aconseguir el percentatge desitjat.

En el present projecte, en el programa Working Model, s'ha utilitzat el mètode del SAG per a determinar la constant elàstica dels amortidors anterior i posterior. Per a determinar la constant d'amortiment tant de l'amortidor anterior i posterior, s'han anat fent proves i intentant simular un comportament el més real possible. Finalment, s'han escollit els valors de constants elàstiques i d'amortiment resumits a la Taula A.1.3.

SUSPENSÍO	CONSTANT ELÀSTICA (N/m)	CONSTANT D'AMORTIMENT (N·s/m)
Anterior	8.666	1.500
Posterior	87.000	1.000

Taula A.1.3: Valors de les constants elàstiques i d'amortiment de les suspensions de la bicicleta

A.2. El ciclista

Tal com s'ha dit anteriorment, el ciclista utilitzat en aquest projecte és una variació del creat per Gerard Guillaumet en el seu projecte final de carrera. Marc Brujats en va fer dues modificacions: reducció de l'alçada de 1,80 m a 1,70 m i addició de l'articulació del turmell. En el present projecte s'ha utilitzat el ciclista ja modificat (Figura A.2.1).

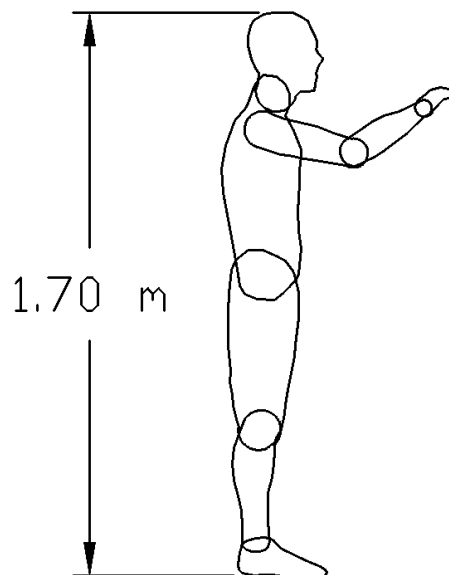


Figura A.2.1: Ciclista amb les modificacions ja fetes

Pel que fa a les masses de cada part del ciclista, també s'ha agafat les proporcions establertes per Gerard Guillaumet i posteriorment també utilitzades per Marc Brujats. Amb aquestes proporcions i amb l'objectiu d'obtenir una massa total del ciclista de 65 kg aproximadament, es va crear la Taula A.2.1.

PART	PERCENTATGE RESPECTE EL TOTAL (%)	MASSA UNITÀRIA (kg)	QUANTITAT	MASSA TOTAL (kg)
Cap + coll	7,9	5,14	1	5,14
Tronc	56,5	36,73	1	36,73
Braç	2,7	1,76	1	1,76
Avantbraç	1,5	0,98	1	0,98
Mà	0,6	0,39	1	0,39
Cuixa	9,7	6,31	2	12,61
Cama	4,5	2,93	2	5,85
Peu	1,4	0,91	2	1,82
Total				65,26

Taula A.2.1: Massa de cada part del cos del ciclista

L'adaptació del ciclista que va fer Marc Brujats també va consistir en afegir una articulació al turmell. Per simular el comportament del ciclista sobre la bicicleta s'han col·locat articulacions entre dues parts del ciclista i se'ls ha condicionat el moviment amb conjunts ressort-amortidor (Figura A.2.2).

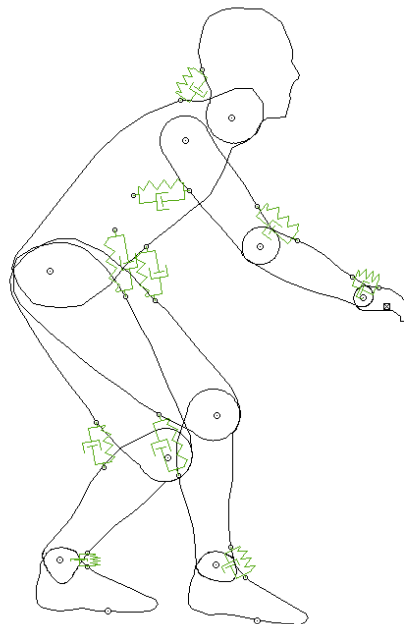


Figura A.2.2: Representació del ciclista amb les seves articulacions

El valor de les constants elàstiques i d'amortiment ha estat escollit per mitjà de proves amb el programa de simulació, tot buscant un moviment real pel cas a estudiar. El valor d'aquestes constants està resumit a la Taula A.2.2.

ARTICULACIÓ	CONSTANT ELÀSTICA (N/m)	CONSTANT D'AMORTIMENT (N·s/m)
Cap - Tronc	30.000	10.000
Tronc - Braç	100	1.000
Braç - Avantbraç	2.000	10.000
Avantbraç - Mà	25.000	20.000
Tronc - Cuixa	30.000	35.000
Cuixa - Cama	5.000	1.000
Cama - Peu	3.000.000	35.000

Taula A.2.2: Valor de les constants elàstiques i d'amortiment de les articulacions del ciclista

Un cop el ciclista està pròpiament definit, s'ha unit a la bicicleta per mitja d'unions rígides. Se n'ha col·locat una entre la mà i el manillar i unes altres entre els peus i els pedals (Figura A.2.3).

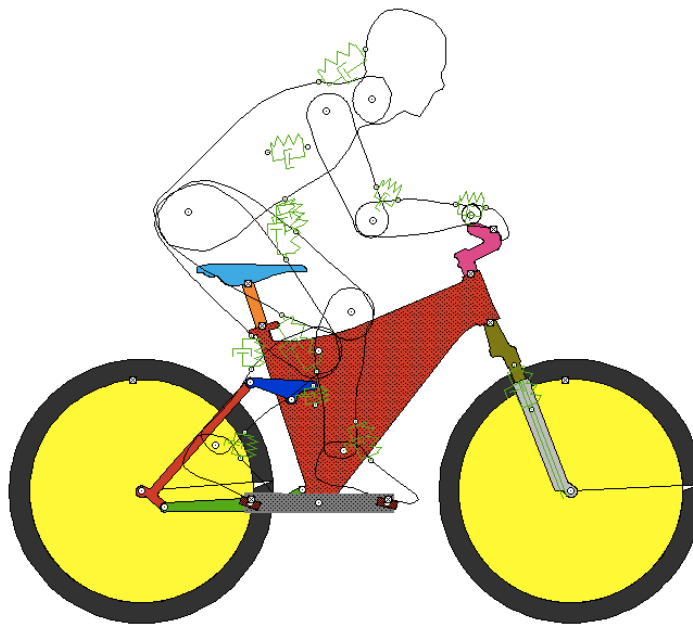


Figura A.2.3: Ciclista ja unit amb la bicicleta

A.3. La llanta: Mavic Crosstrail 26"

La llanta d'aquest estudi és la Mavic Crosstrail, feta d'alumini. És una llanta de gamma mitjana-alta, la qual té un diàmetre de 26 polzades. A dia d'avui, però, s'està imposant una mida de llanta superior, ja sigui de 27,5 o 29 polzades.

Ja fa uns anys que van sortir al mercat les llantes de 29 polzades, les quals presumien d'avantatges com una major inèrcia, una major superfície de contacte amb el terra i més adherència, i també d'una major comoditat degut a no notar tant les irregularitats del terreny. No obstant, també fallaven en alguns aspectes com per exemple que tenien un centre de gravetat més alt, menys agilitat i maniobrabilitat, etc. Així doncs, uns anys més tard van començar a sortir al mercat les de 27,5", les quals suposaven un terme mig entre les clàssiques de 26" i les revolucionàries de 29". A hores d'ara, la majoria dels principals fabricants de bicicletes ja només tenen al seu catàleg les bicicletes de 27,5" i les de 29", havent quedat les de 26" únicament per un mercat més enfocat a bicicletes de descens i Freeride.

Pel que respecta a aquest projecte, cal tenir en compte que l'estudi d'una llanta que tingués un diàmetre superior possiblement seria més favorable, ja que la força d'impacte no seria tan gran com ho és en la llanta de 26 polzades estudiada. Així doncs, com més gran és la llanta, menys esforços pateix al pujar un esgraó d'una mida determinada.

ANNEX B: LA SIMULACIÓ EN WORKING MODEL

B.1. Introducció

El programa Working Model 2D permet fer simulacions de cossos en dues dimensions juntament amb la interacció amb elements com ressorts, amortidors, motors, cordes, etc. A més, permet l'exportació i avaluació de dades resultants de la simulació, és a dir, permet mesurar diverses variables del conjunt creat com per exemple forces, moments, velocitat, etc.

Es tracta d'un programa bastant intuïtiu i simple d'usar, tot i que té molts aspectes a millorar. Per exemple, en l'apartat de disseny és bastant escàs i per reproduir geometries complexes resulta molt més fàcil fer-ne la importació directament des d'un altre programa com pot ser l'AutoCAD.

Per crear la interacció entre diversos elements sí que és molt fàcil i intuïtiu. No obstant, un problema que cal tenir en compte és la interacció entre dos cossos, la qual es pot definir de dues maneres: COLLIDE (que xoquin entre ells) o DO NOT COLLIDE (que no xoquin entre ells). En aquest projecte s'han unit els cossos mitjançant articulacions o bé unions rígides, i se n'ha restringit el moviment a partir de conjunts ressort-amortidor de primer ordre, és a dir, seguint les equacions 1 i 2.

$$F = k \cdot x \quad (\text{Eq. 1})$$

$$F = c \cdot v \quad (\text{Eq. 2})$$

El programa també permet la utilització de ressorts i amortidors separatament, amb els quals es poden utilitzar comportaments diferents. En el ressorts es permeten configuracions de fins a tercer ordre quan la força és directament proporcional al desplaçament i de fins a segon ordre quan la força és inversament proporcional al desplaçament. Pels amortidors, en canvi, només es permeten comportaments de fins a tercer ordre i només amb la força directament proporcional a la velocitat.

A l'hora d'avaluar els resultats, el programa permet la utilització de diversos mètodes. Pot mostrar el valor total o bé el valor en una direcció concreta segons un eix. A més, pot fer-ho numèricament o gràficament. Aquest últim mètode resulta molt útil per saber en quin instant s'assoleix el valor màxim i, posteriorment, movent la simulació fotograma a fotograma es pot arribar a mostrar el valor de les variables en aquest instant. Si es desitja, el programa

també permet exportar els valors d'una variable al llarg del temps en un full de càlcul d'Excel, per així saber-ne els valors exactes i poder-los analitzar.

B.2. Modelització i efecte del pneumàtic

Per tal de simular l'efecte del pneumàtic de la manera més real possible, s'ha optat per afegir un ressort i un amortidor directament a l'esgraó. Com que l'única cosa que fa el pneumàtic és modificar la interacció directa entre la llanta i l'esgraó, tant és afegir-lo a la llanta com a l'esgraó. D'aquesta manera s'aconsegueix fer un disseny més senzill i no complicar més la bicicleta i la llanta.

Bàsicament, l'aire contingut dins el pneumàtic atribueix un comportament elàstic a aquest, ja que l'efecte d'amortir el cop no és tant important com l'efecte elàstic.

Així doncs, s'ha intentat aconseguir un comportament el màxim real possible en el qual el desplaçament màxim de l'esgraó (pneumàtic) sigui de 5 cm, és a dir, de la mida de l'alçada del pneumàtic quan aquest està completament inflat.

Finalment s'ha escollit un ressort de segon grau i un amortidor de primer grau. Les equacions, juntament amb les seves constants corresponents, són l'equació 3 i l'equació 4 respectivament.

$$F = 10^6 \cdot x^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$F = 1000 \cdot v \quad (\text{Eq. 4})$$

ANNEX C: L'ANÀLISI DE TENSIONS EN ELEMENTS FINITS (ANSYS)

C.1. Tipus d'elements

El programa d'elements finits ANSYS Workbench crea uns elements per defecte que són acceptables. No obstant, per tal de millorar el mallat es pot escollir el tipus d'elements a utilitzar. En aquest projecte s'ha escollit el mètode HEX DOMINANT, el qual prioritza la utilització d'elements de quatre vèrtexs per cara. Si això no es possible, utilitza elements de tres vèrtexs per cara. Concretament utilitza els anomenats SOLID186 i SOLID187.

Els elements SOLID186 (Figura C.1.1) són elements tridimensionals que tenen 20 nodes. Poden ser de diversos tipus, tot i que els més corrents són els que tenen 6 cares de 4 vèrtexs cadascuna.

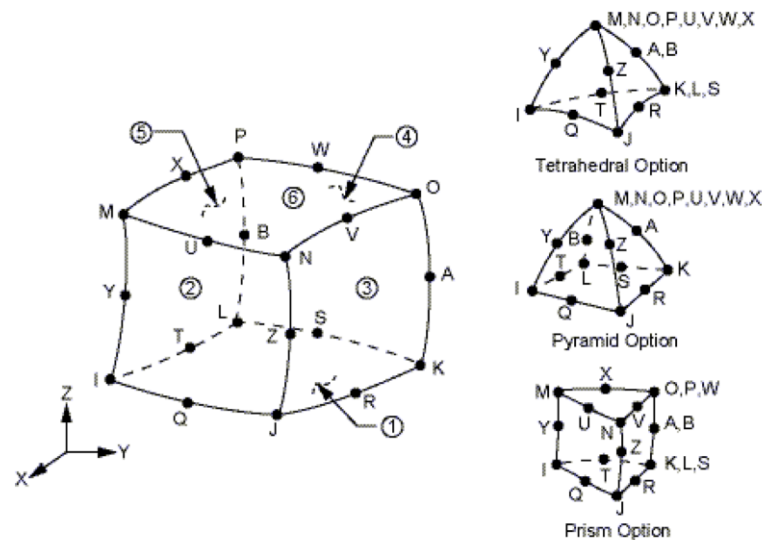


Figura C.1.1: Elements SOLID186, formats per 20 nodes cadascun

Els elements SOLID187 (Figura C.1.2) també són elements tridimensionals, però aquests tenen 10 nodes cadascun. Tenen quatre cares de tres vèrtexs cadascuna, és a dir, formen una piràmide.

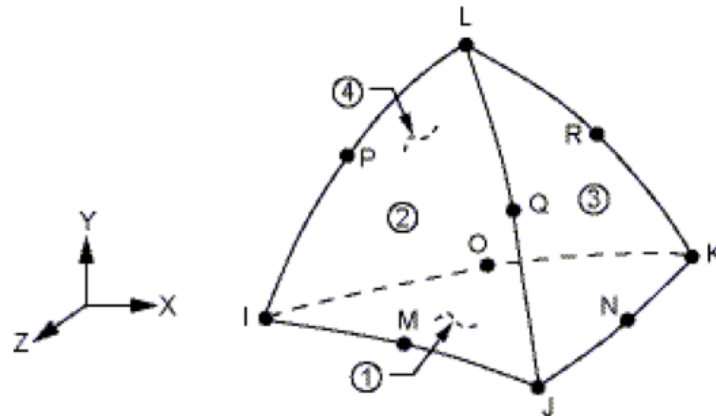


Figura C.1.2: Elements SOLID187, formats per 10 nodes cadascun

Tant els elements SOLID186 i SOLID187 comparteixen les característiques següents:

1. Cada node té tres graus de llibertat (desplaçament en les tres direccions).
2. Suporten càlculs amb materials híper-elàstics, així com càlculs amb plasticitat. Aquests últims sí que seran necessaris en el present projecte.
3. Són molt utilitzats per mallar superfícies irregulars provinents d'una geometria complexa realitzada amb un programa de dibuix com és el cas d'aquest projecte.

A més, als elements SOLID186, s'ha utilitzat la integració completa de tots els elements (FULL INTEGRATION). Aquest mètode, respecte la integració reduïda, té l'avantatge que es pot usar quan en alguna direcció hi ha només un sol element (en seccions primes com podria ser el cas d'aquest projecte). A més, el resultat obtingut és més acurat ja que s'integra respecte cadascun dels nodes de l'element i no només respecte un sol node com es fa en l'altre mètode per defecte UNIFORM REDUCED INTEGRATION.